



ОБОРУДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

© Школа для электрика - <http://electricalschool.info>

Повный А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

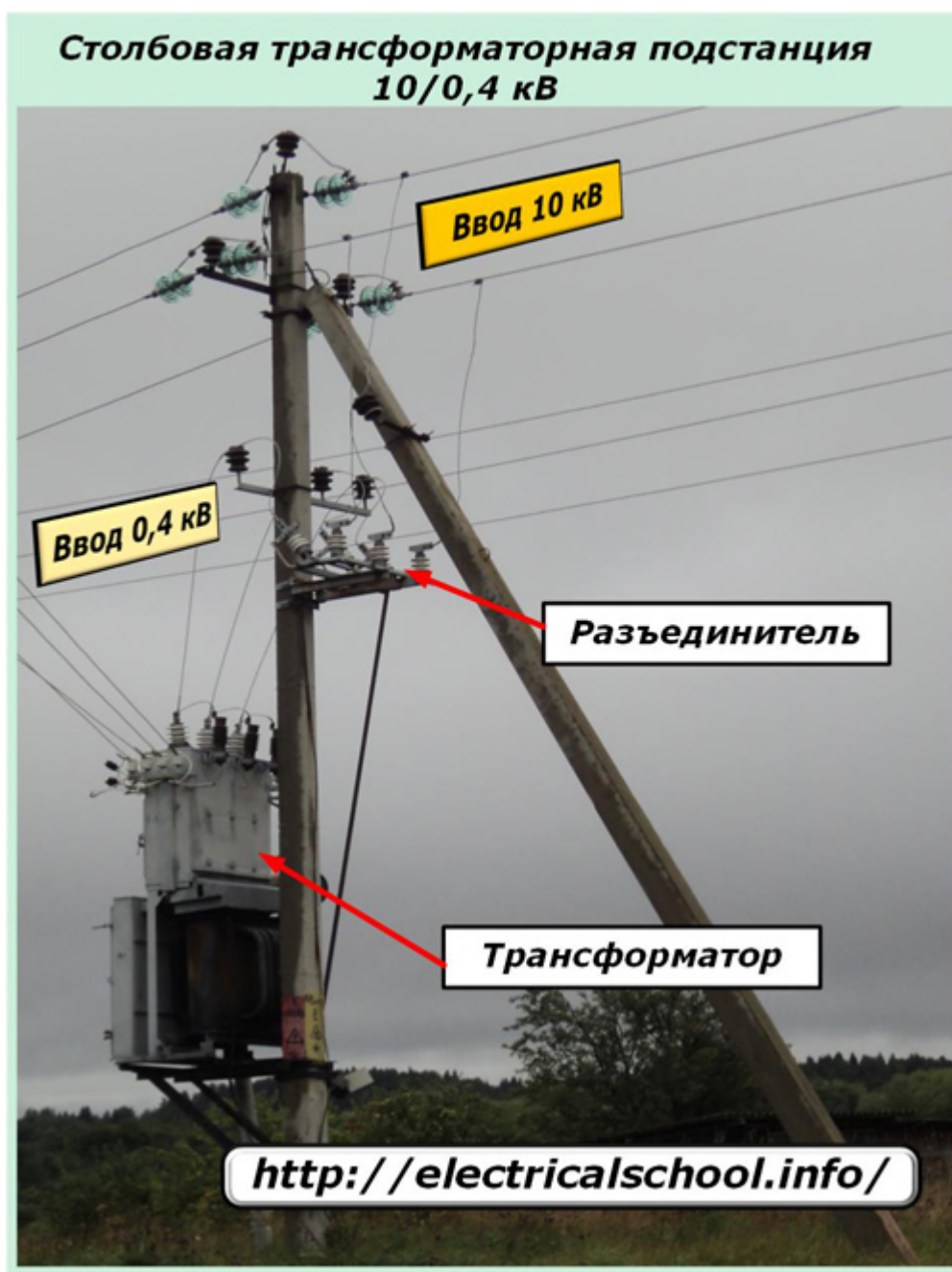
1. Состав оборудования трансформаторных подстанций
2. Силовые трансформаторы
3. Разъединители
4. Отделители и короткозамыкатели
5. Высоковольтные выключатели
6. Трансформаторы тока и напряжения
7. Заземляющие устройства трансформаторных подстанций



ВВЕДЕНИЕ

Сложная иерархия современных электрических сетей включает в себя огромное количество различного электротехнического оборудования, среди которого трансформаторные подстанции выполняют роль звена, связующего и перераспределяющего электроэнергию. Они располагаются около или внутри населенных пунктов и обеспечивают комфортные условия для проживания людей.

В сельской местности еще можно встретить конструкции старых столбовых подстанций, работающих на открытом воздухе, которые принимают по высокой стороне воздушной линии 10 или 6 кВ и отдают 0,4 подключенным потребителям.



Внутри населенных пунктах с многоэтажными зданиями в целях безопасности чаще применяются кабельные линии, скрытые в земле, а трансформаторное оборудование располагается внутри специальных построек, закрытых на замки от несанкционированного проникновения.

Здание подобной трансформаторной подстанции, преобразующей напряжение 10 кВ в 0,4 показано на фотографии.



Внешнее отличие габаритов показанных подстанций, преобразующих напряжения одинаковых величин, свидетельствует о том, что они оперируют разными мощностями.

Подобные трансформаторные подстанции (ТП) получают электроэнергию по высоковольтным линиям электропередач 10 кВ (или 6) от удаленных распределительных устройств.

Фотография силового трансформатора, расположенного на ОРУ-110 и осуществляющего преобразование электроэнергии 110 кВ в 10, передаваемое по ЛЭП на ПС-10, показана на очередной фотографии.



Этот трансформатор имеет уже бóльшие габариты и оперирует с мощностями до 10 мегаватт, располагается на открытой, огороженной территории, которая конструкцией оборудования четко разграничена на две стороны:

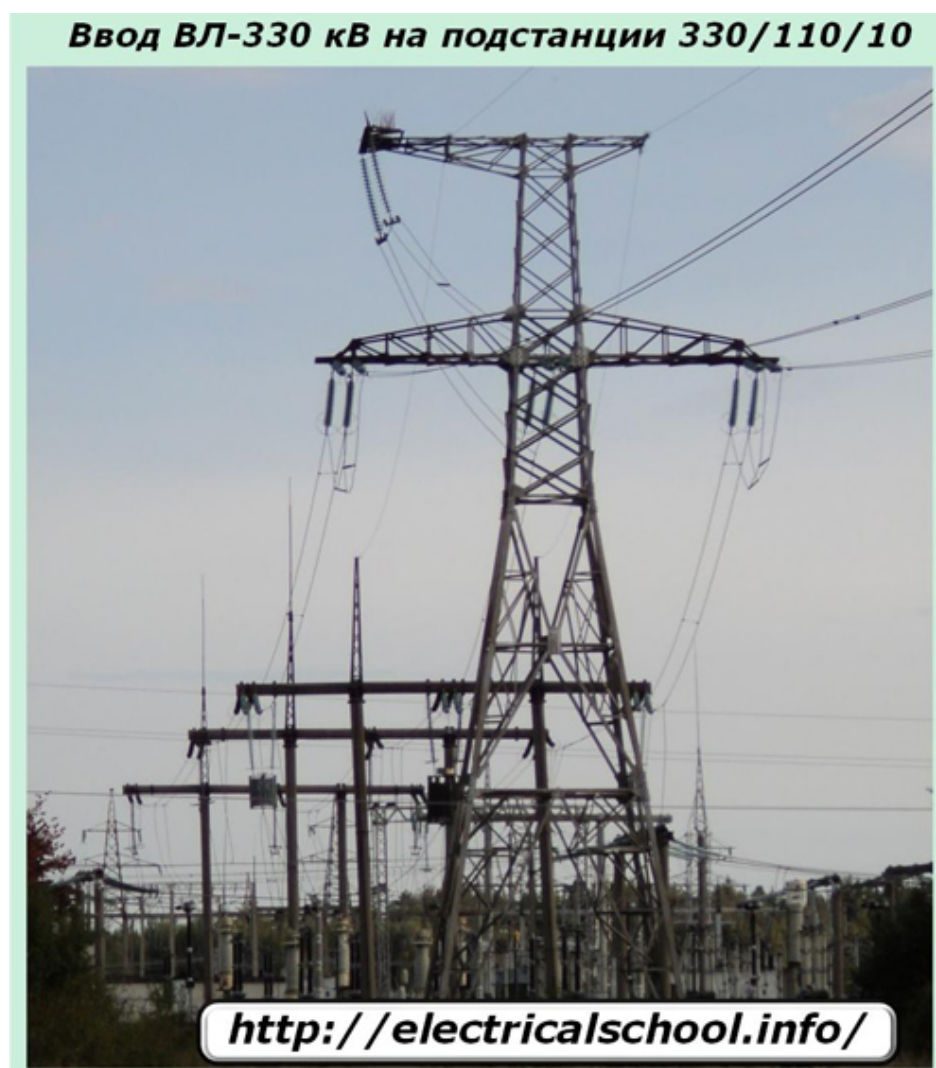
- высшего напряжения 110;
- низшего — 10 кВ.

Сторона 110 кВ воздушной ЛЭП соединяется с другой подстанцией, которая имеет еще бóльшие габариты и преобразовывает огромные энергетические потоки.

План ее размещения, габариты и структурное разделение на зоны по типу напряжения показаны на фотографии.

Размеры только вводной опоры единичной воздушной ЛЭП позволяют визуально оценить значительность потоков электроэнергии, пропускаемых через нее.

Приведенные ниже фотографии свидетельствуют, что трансформаторные подстанции в энергетике перерабатывают энергию электричества различных напряжений и мощностей, монтируются разнообразными конструкциями, но имеют общие черты.



1. СОСТАВ ОБОРУДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

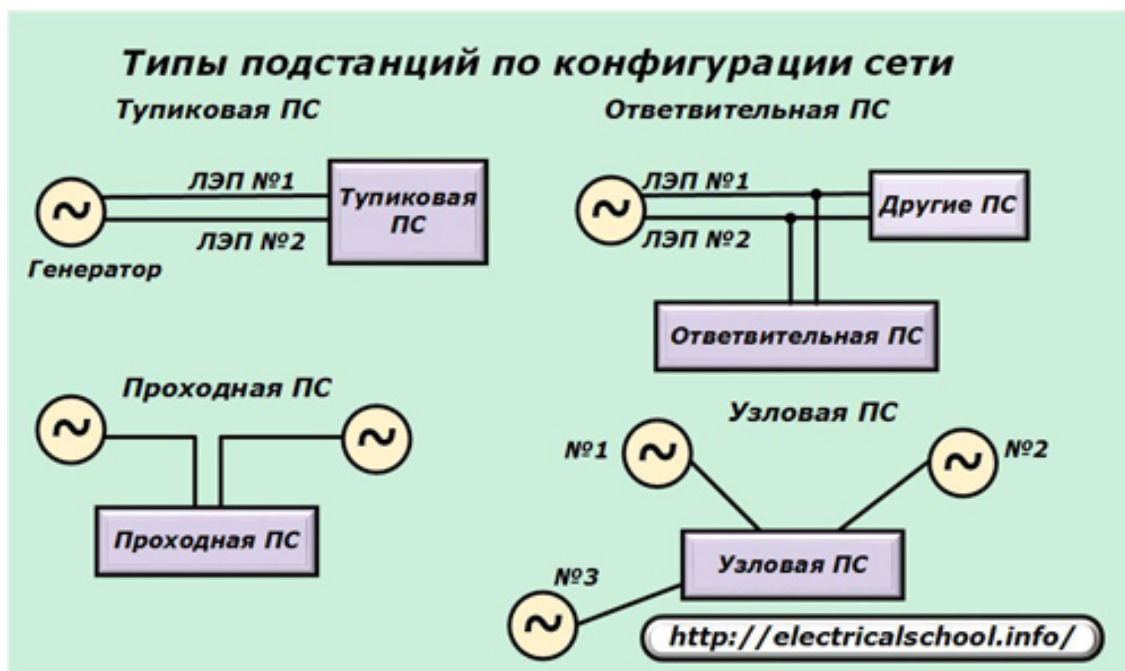
Условия работы

Каждая ПС создается под конкретные условия эксплуатации с расположением:

- на открытом воздухе — открытые распределительные устройства (ОРУ);
- внутри закрытых помещений — ЗРУ;
- в металлических шкафах, встроенных в специальные комплекты — КРУ.

По типу конфигурации электрической сети трансформаторные ПС могут выполняться:

- тупиковыми, когда они запитаны по одной либо двум радиально подключенным ЛЭП, которые не питают другие ПС;
- ответвительными — присоединяются к одной (иногда двум), проходящим ЛЭП с помощью ответвлений. Проходящие линии питают другие подстанции;
- проходными — подключены за счет захода ЛЭП с двухсторонним питанием методом «вреза»;
- узловыми — присоединяются по принципу создания узла за счет не менее чем трех линий.



Конфигурация сети электроснабжения накладывает условия на рабочие характеристики подстанции, включая настройку защит для обеспечения безопасной работы.

Основные элементы ПС

В состав оборудования любой подстанции входят:

- силовой трансформатор, который непосредственно осуществляет преобразование электроэнергии для ее дальнейшего распределения;
- шины, обеспечивающие подвод приходящего напряжения и отвод нагрузок;
- силовые коммутационные аппараты с токовыми, позволяющие перераспределять электроэнергию;
- системы защит, автоматики, управления, сигнализации, измерения;
- вводные и вспомогательные устройства.

Силовой трансформатор

Он является основным преобразующим элементом электроэнергии и выполняется трехфазным исполнением. В его конструкцию входят:

- корпус, выполненный в форме герметичного бака, заполненного маслом;
- шихтованный магнитопровод;
- обмотки стороны низкого напряжения (НН);
- обмотки вводов высокого напряжения (ВН);
- масляная система;
- переключатель регулировочных отводов у обмоток;
- вспомогательные устройства и системы.

Шины подстанции

Чтобы трансформатор работал к нему надо подвести питающее и отвести преобразованное напряжение. Эта задача возложена на токоведущие части, которые называют шинами и ошиновкой. Они должны надежно передавать электрическую энергию, обладая минимальными потерями напряжения.

Для этого их создают из материалов с улучшенными токопроводящими свойствами и повышенным поперечным сечением. В зависимости от размеров ПС шины могут располагаться на открытом воздухе или внутри закрытого сооружения.

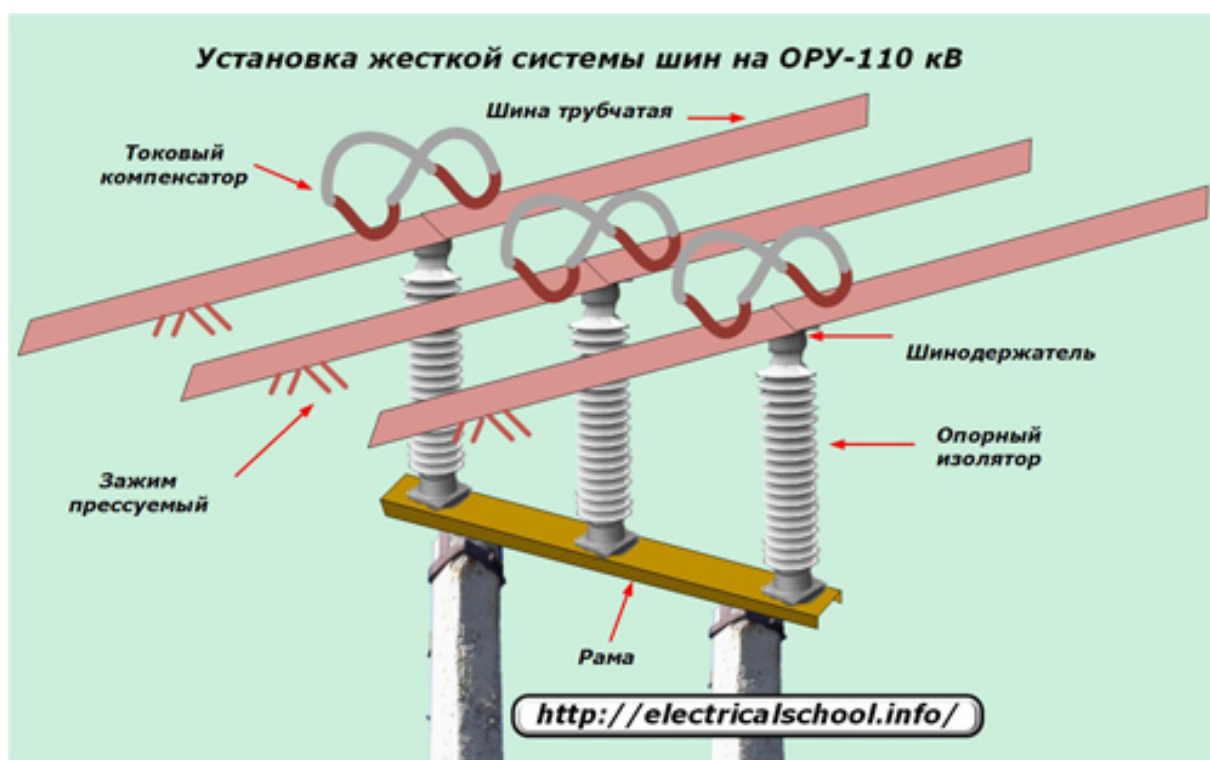
Шины и ошиновка электрически разделяются между собой положением силового выключателя. Причем ошиновка без каких-либо коммутационных аппаратов напрямую подключена к вводам трансформатора. Ее конструкция не должна создавать механических напряжений в фарфоровых и всех остальных деталях вводов.

Для ошиновки используют кабели или пластины, которые монтируют на медные шпильки трансформаторных вводов через наконечники или переходники.

У подстанций, защищенных от воздействия атмосферных осадков, шины обычно делают цельными алюминиевыми или реже медными полосами. На открытом воздухе для них чаще используют многожильные не закрытые слоем изоляции провода повышенного сечения и прочности.



Однако, в последнее время наметился переход на системы шин, устанавливаемые жестко. Это позволяет экономить площадь на ОРУ, металл токоведущих частей и бетон.



Такие конструкции применяются на новых строящихся подстанциях. За их основы взяты образцы, успешно работающие несколько десятилетий в странах Запада на оборудовании 110, 330 и 500 кВ.

Для расположения шин применяется определенная конфигурация, которая может использовать:

- системы;
- секции.

Под термином «система шин» подразумевается комплект силовых элементов, подключающих все присоединения на распределительном устройстве. На подстанциях с двумя трансформаторами одного напряжения создаются две системы шин, каждая из которых питается от своего источника.

Протяженная система шин при большом количестве присоединений может разделяться на отдельные участки, которые называются секциями.

Силовые коммутационные аппараты

Трансформаторные подстанции при эксплуатации необходимо подключать под напряжение или выводить из работы для профилактического обслуживания или в случае возникновения аварийных ситуаций и неисправностей. С этой целью используются коммутационные аппараты, которые создаются различными конструкциями и могут:

1. отключать аварийные токи максимально возможных величин;
2. коммутировать только рабочие нагрузки;
3. обеспечивать разрыв видимого участка электрической схемы за счет переключения только при снятом с оборудования напряжении.

Коммутационные аппараты, способные отключать аварийные ситуации, работают в автоматическом режиме и называются «автоматическими выключателями». Они создаются с различными возможностями коммутации нагрузок за счет конструктивных особенностей.

По принципу использования запасенной энергии, заложенной в работу исполнительного механизма, их подразделяют на:

- пружинные;
- грузовые;
- давления;
- электромагнитные.

По способам гашения электрической дуги, возникающей при отключениях, они классифицируются на:

- воздушные;
- элегазовые;
- вакуумные;

- масляные;
- автогазовые;
- электромагнитные;
- автопневматические.

Для управления исключительно рабочими режимами, характеризующимися только номинальными параметрами сети, создаются «выключатели нагрузки». Мощность их контактной системы и скорость работы позволяют успешно переключаться при обычном состоянии схемы. Но, ими нельзя оперировать для ликвидации коротких замыканий.

При разрыве электрической цепи под нагрузкой создается электрическая дуга, которая ликвидируется конструкцией выключателя. В обесточенной схеме для отделения определенного участка от напряжения используют более простые устройства:

1. разъединители;
2. отделители.

Разъединителями оперируют, как правило, вручную при снятом напряжении. На подстанциях 330 кВ и выше управление разъединителями осуществляется электродвигателями. Это объясняется большими габаритами и механическими усилиями, которые сложно преодолеть вручную.

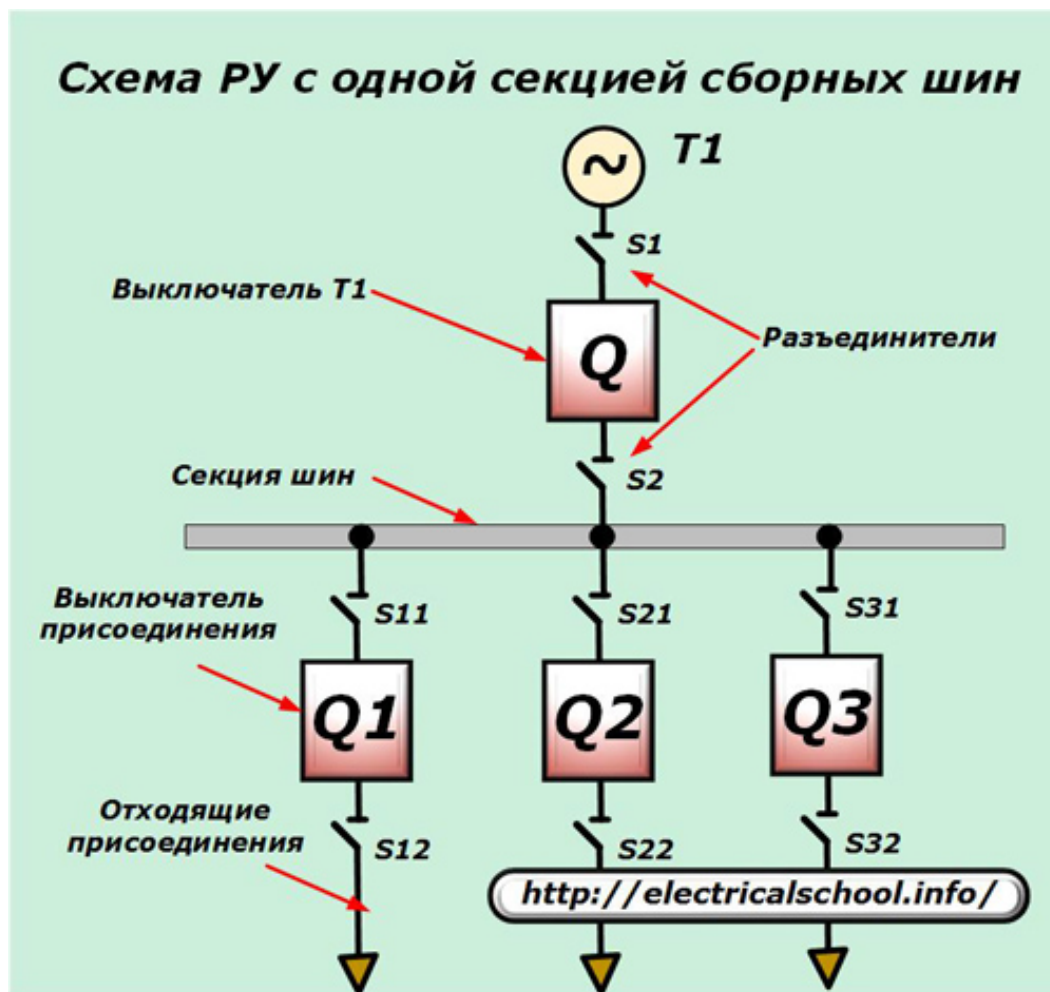
При включении разъединителя участок его цепи собирается в электрическую схему, а при отключении — выводится.

Отделители создаются для автоматического разделения напряжения с защищаемого участка при создании на нем бестоковой паузы удаленным выключателем.

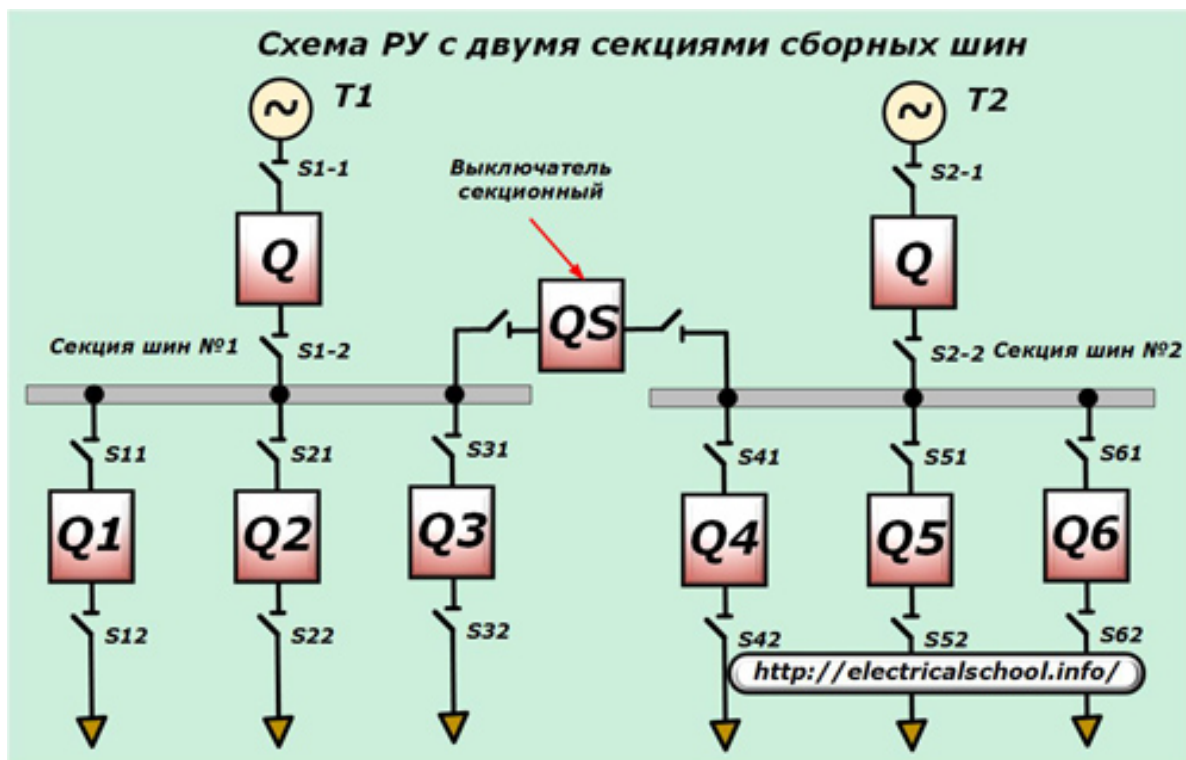
Взаимное расположение коммутационных аппаратов и шин

Любая трансформаторная подстанция создается по определенной электрической схеме, предполагающей обеспечение надежной работы, простоты управления в сочетании с минимумом затрат на ввод и эксплуатацию. С этой целью к трансформаторному устройству разными способами подключаются отходящие ЛЭП.

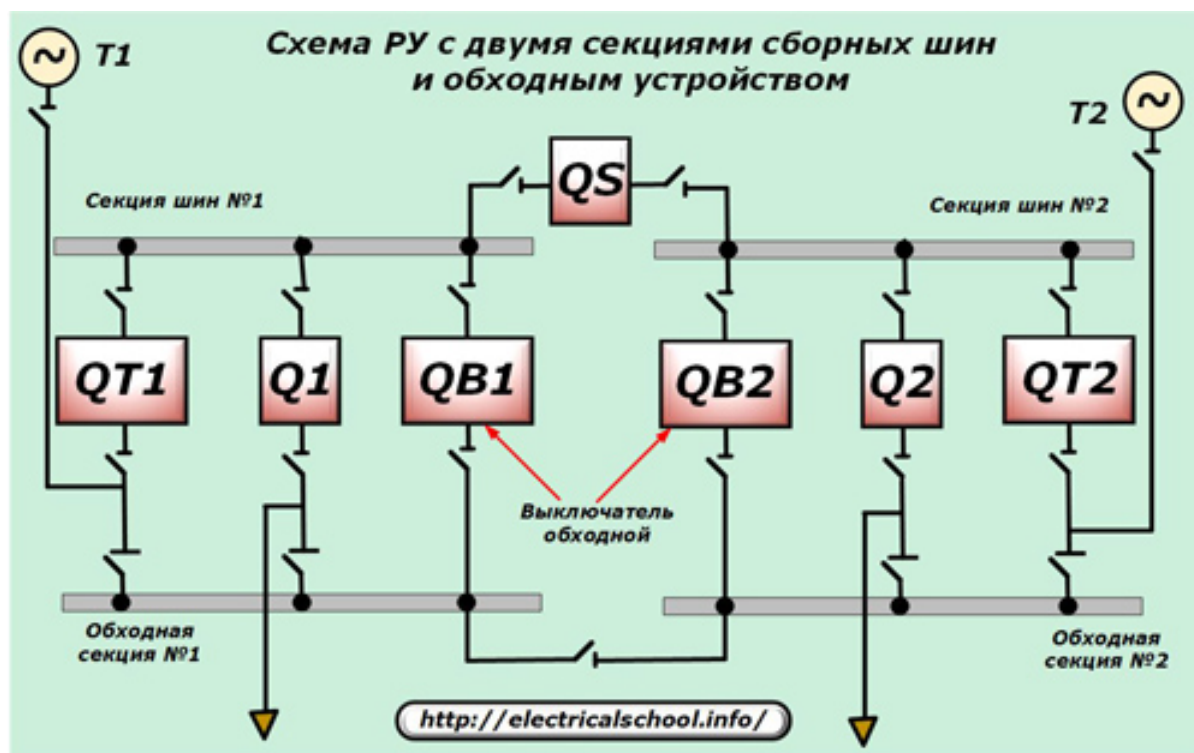
Наиболее простая схема предполагает подключение к ТП посредством силового выключателя Q одной секции шин, от которой отходят все присоединения. Для обеспечения условий безопасного ремонта оборудования выключатели со всех сторон отделяются разъединителями.



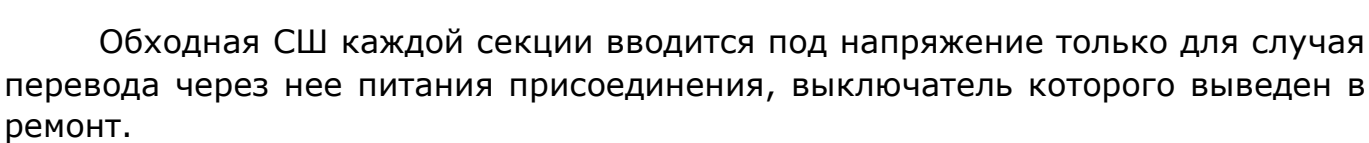
Если на ПС много присоединений, когда в схеме используются 2 силовых трансформатора, то может применяться секционирование за счет использования дополнительного выключателя, который постоянно находится в работе, а при возникновении неисправности на одной из секций разрывает цепь, оставляя в работе ту секцию, где нет поломки.



Использование в такой схеме обходной системы шин, образованной за счет подключения дополнительных выключателей и небольшой корректировки электрических цепей, позволяет переводить любое присоединение на питание от обходного выключателя, безопасно выполнять ремонт и обслуживание собственного.



В исходном состоянии все отходящие ЛЭП получают электроэнергию от обоих трансформаторов. Для этого шинные и секционные выключатели питают секции шин, а присоединения равномерно распределены по ним через свои коммутационные устройства.



Приведенные схемы показаны для примера. Их существует большое разнообразие, которое позволяет наиболее оптимально эксплуатировать оборудование трансформаторной подстанции.

Работа оборудования трансформаторной подстанции происходит в автоматическом режиме под дистанционным наблюдением оперативного

персонала. Чтобы предотвратить серьезные повреждения внутри сложной дорогостоящей системы применяются автоматические защитные устройства.

Они имеют чувствительные датчики, которые воспринимают начало возникновения аварийных процессов и, обрабатывая полученную информацию, передают ее на защиты.

Таковыми датчиками могут работать механические приборы, реагирующие на:

- повышение температуры;
- возникновение вспышки света;
- резкое возрастание давления внутри закрытой ячейки;
- образование дыма;
- начало газообразования внутри жидкостей или другие признаки.

Однако, основная нагрузка по определению начала аварийных режимов возложена на электрические устройства — измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Они с высокой точностью моделируют электрические процессы, происходящие в первичной схеме силового оборудования и передают их в органы сравнения, которые определяют момент возникновения неисправностей.

Полученный сигнал от них воспринимают логические блоки, обрабатывающие поступившую информацию для передачи исполнительной команды на отключающие устройства конкретных автоматических выключателей.

У малогабаритных трансформаторных подстанций, размещенных внутри крытых сооружений, защиты могут располагаться в отдельной ячейке или шкафу.

На подстанциях, преобразующих напряжение 110 кВ и выше, для размещения релейных вторичных цепей требуется отдельное здание с большим количеством панелей. На них монтируют системы управления, автоматики и защиты:

- каждого трансформатора;
- ошиновки;
- шин;
- отходящих линий;
- пожаротушения.

К этим устройствам подключаются системы сигнализации, работающие в местном и дистанционном режиме для передачи оперативному персоналу достоверных сведений о происходящих коммутациях в электрической сети.

Наиболее важная информация о положении ответственных элементов оборудования передаются по каналам телесигнализации.

Используемые многие десятилетия релейные защиты постепенно вытесняются микропроцессорными малогабаритными модулями, облегчающими эксплуатацию.

Однако, их массовое использование сдерживается высокой стоимостью и отсутствием точных международных стандартов для всех производителей. Ведь при поломке отдельного специфичного блока пользователю приходится обращаться к конкретному заводу для замены возникшей неисправности.

2. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

При транспортировке электроэнергии на большие расстояния для снижения потерь используется принцип трансформации. Для этого электричество, вырабатываемое генераторами, поступает на трансформаторную подстанцию. На ней повышается амплитуда напряжения, поступающего в линию электропередачи.

Второй конец ЛЭП подключен на ввод удаленной подстанции. На ней для распределения электричества между потребителями осуществляется понижение напряжения.

На обеих подстанциях трансформацией электроэнергии больших мощностей занимаются специальные силовые устройства:

1. трансформаторы;
2. автотрансформаторы.

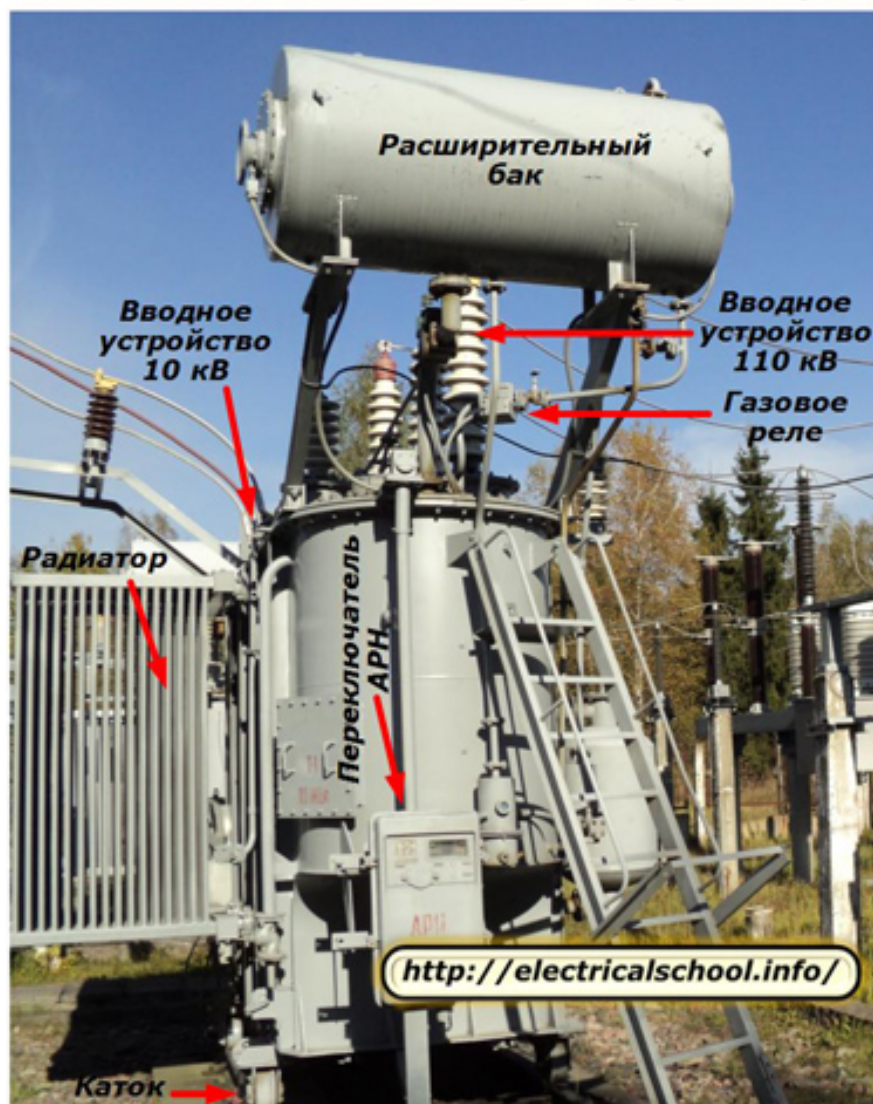
Они имеют много общих признаков и характеристик, но отличаются определенными принципами работы. Эта статья описывает только первые конструкции, у которых передача электроэнергии между разделенными обмотками происходит за счет электромагнитной индукции. При этом изменяющиеся по амплитуде гармоники тока и напряжения сохраняют частоту колебаний.

Особенности устройства

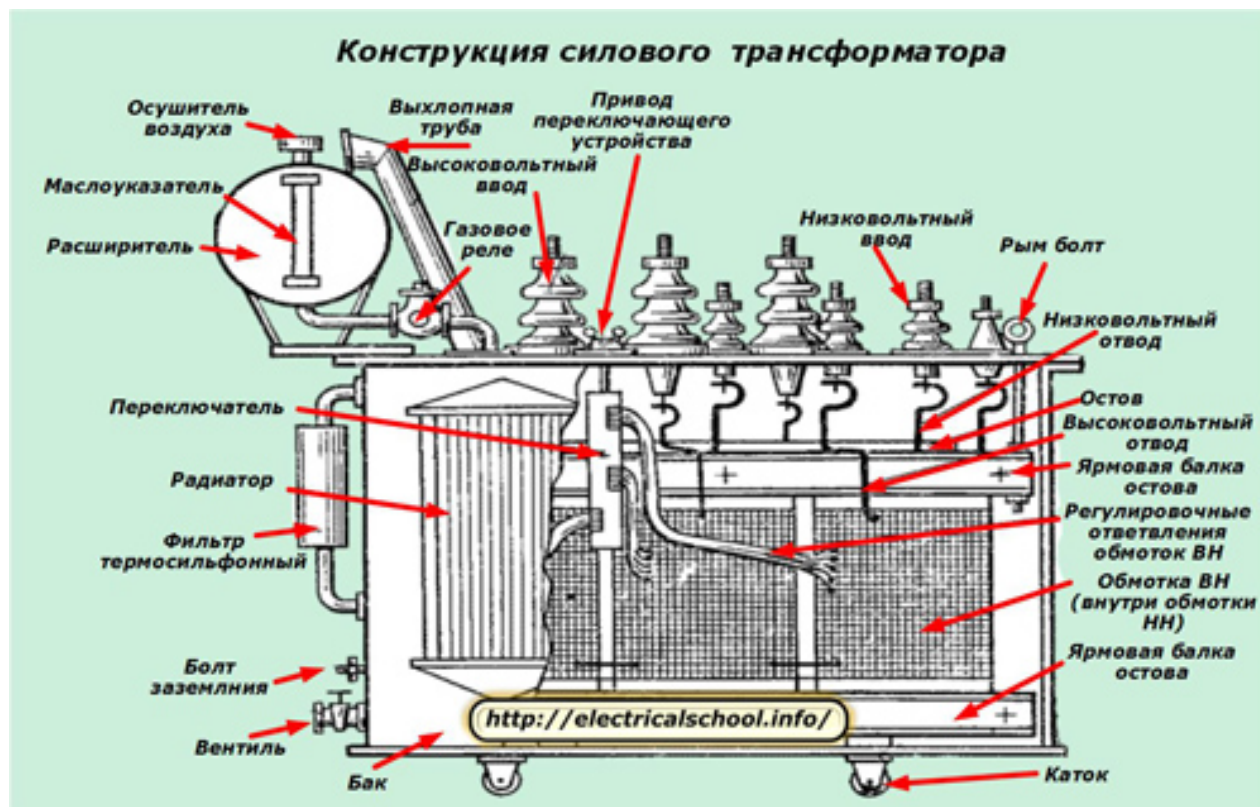
Силовые трансформаторы в энергетике устанавливаются на заранее подготовленные стационарные площадки с прочными фундаментами. Для размещения на грунте могут монтироваться рельсы и катки.

Общий вид одного из многочисленных типов силовых трансформаторов, работающего с системами напряжений 110/10 кВ и обладающего величиной полной мощности 10 МВА, показан на фотографии ниже.

Общий вид силового трансформатора



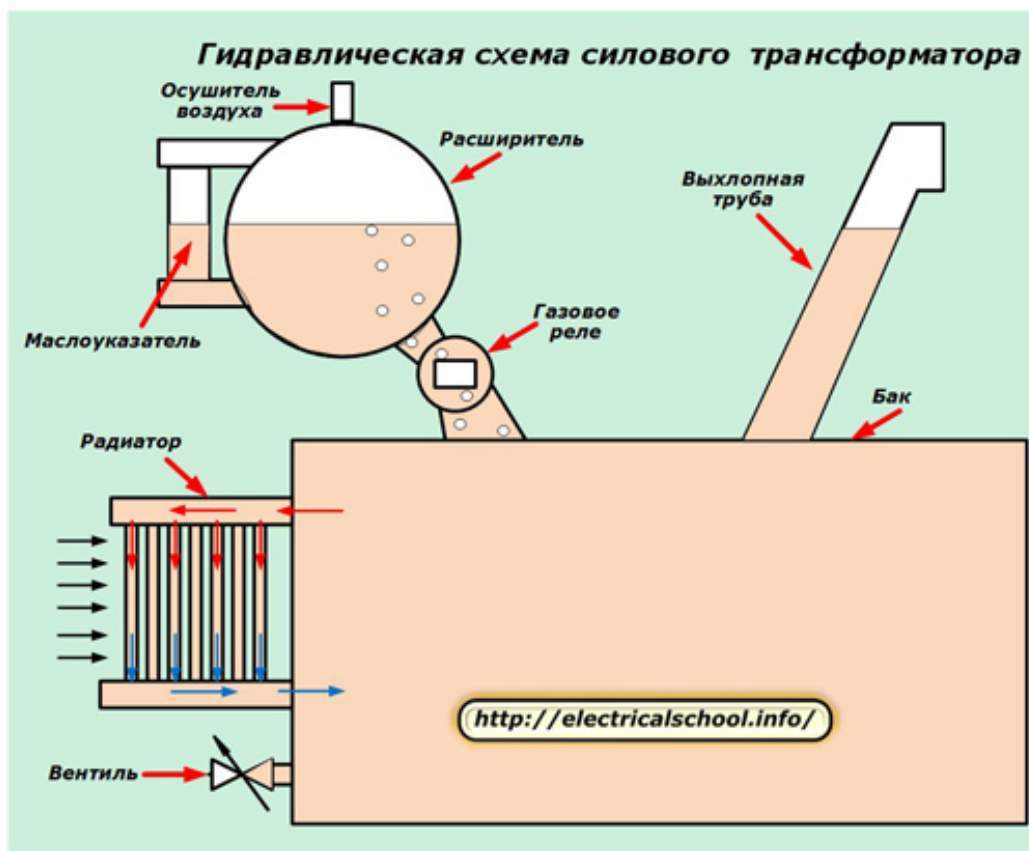
Отдельные ярко выраженные элементы его конструкции снабжены подписями. Более подробно устройство основных частей и их взаимное расположение демонстрирует чертёж ниже.



Электрическое оборудование трансформатора размещается внутри металлического корпуса, изготовленного в форме герметичного бака с крышкой. Он заполнен специальным сортом трансформаторного масла, которое обладает высокими диэлектрическими свойствами и, одновременно, используется для отвода тепла от деталей, подвергаемых большим токовым нагрузкам.

Гидравлическая схема трансформатора

Упрощенно состав и взаимодействие ее основных элементов показано на картинке.



Для залива/слива масла используются специальные задвижки и вкручивающаяся пробка, а запорный вентиль, расположенный внизу бака, предназначен для отбора проб масла и последующего проведения его химического анализа.

Принципы охлаждения

В силовом трансформаторе образовано два контура циркуляции масла:

1. внешний;
2. внутренний.

Первый контур представлен радиатором, состоящим из верхнего и нижнего коллекторов, соединенных системой металлических трубок. Через них проходит нагретое масло, которое, находясь в магистралях охладителя, остывает и возвращается в бак.

Внутри бака циркуляция масла может производиться:

- естественным путем;
- принудительно за счет создания давления в системе насосами.

Часто поверхность бака увеличивается за счет создания гофр — специальных металлических пластин, улучшающих теплообмен между маслом и окружающей атмосферой.

Забор тепла от радиатора в атмосферу может выполняться обдувом системой вентиляторов или без них за счет свободной конвекции воздуха. Принудительный обдув эффективно повышает теплосъем с оборудования, но увеличивает затраты энергии на эксплуатацию системы. Они могут снизить нагрузочную характеристику трансформатора до 25%.

Тепловая энергия, выделяемая современными трансформаторами повышенной мощности, достигает огромных величин. Об ее размере может служить тот факт, что сейчас за ее счет стали реализовывать проекты отопления промышленных зданий, расположенных рядом с постоянно работающими трансформаторами. В них поддерживаются оптимальные условия работы оборудования даже в зимнее время.

Контроль уровня масла в трансформаторе

Масло постоянно циркулирует внутри бака. Его температура зависит от целого комплекса воздействующих факторов. Поэтому объем его все время изменяется, но поддерживается в определенных границах. Для компенсации объемных отклонений масла служит расширительный бачок. В нем удобно наблюдать текущий уровень.

Для этого используется маслоуказатель. Наиболее простые устройства изготавливают по схеме сообщающихся сосудов с прозрачной стенкой, заранее проградуированной в единицах объема.

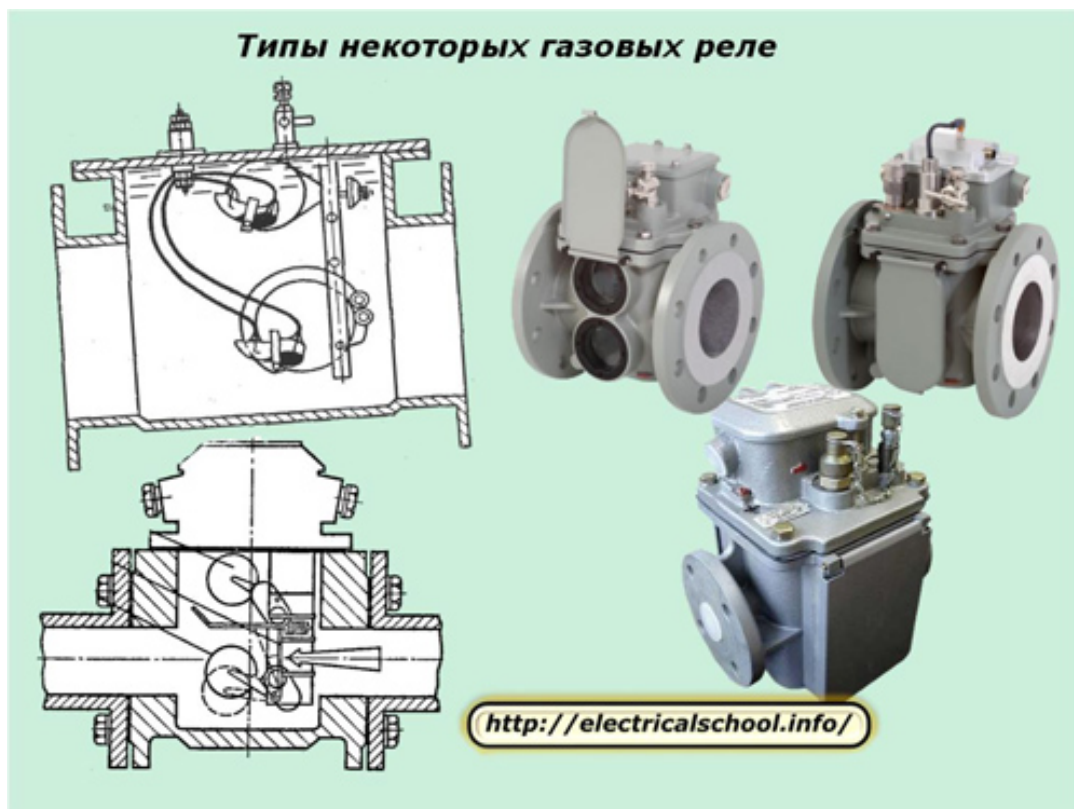
Подключения такого маслоуказателя параллельно расширительному баку вполне достаточно для контроля эксплуатационных характеристик. На практике встречаются и другие, отличные от этого принципа работы маслоуказатели.

Защита от проникновения влаги

Поскольку верхняя часть расширительного бака контактирует с атмосферой, то в ней устанавливают осушитель воздуха, препятствующий проникновению влаги внутрь масла и снижению его диэлектрических свойств.

Защита от внутренних повреждений

Важным элементом масляной системы является газовое реле. Его монтируют внутри трубопровода, соединяющего основной бак трансформатора с расширительным. За счет этого все газы, выделяемые при нагреве из масла и органической изоляции, проходят через емкость с чувствительным элементом газового реле.



Этот датчик отстроен от работы на очень маленькое, допустимое газообразование, но срабатывает при его увеличении в два этапа:

1. на выдачу светового/звукового предупредительного сигнала обслуживающему персоналу о возникновении неисправности при достижении уставки первой величины;
2. на отключение силовых автоматических выключателей со всех сторон трансформатора для снятия напряжения при бурном газообразовании, свидетельствующем о начале мощных процессов разложения масла и органической изоляции, начинающихся при коротких замыканиях внутри бака.

Дополнительная функция газового реле — контроль уровня масла в баке трансформатора. При снижении его до критической величины газовая защита может отработать в зависимости от настройки:

- только на сигнал;
- на отключение с выдачей сигнала.

Защита от аварийного повышения давления внутри бака

На крышке трансформатора так монтируется выхлопная труба, чтобы ее нижний конец сообщался с емкостью бака, а масло поступало внутрь до уровня в расширителе. Верхняя часть трубы возвышается над расширителем и отводится в сторону, немного загибается вниз. Ее конец герметично закрыт стеклянной предохранительной мембраной, которая разрушается при аварийном повышении давления из-за возникновения нерасчетного нагрева.

Другая конструкция подобной защиты основана на монтаже клапанных элементов, которые открываются при повышении давления и закрываются при его сбросе.

Еще один вид — сильфонная защита. Она основана на быстром сжатии сильфона при резком повышении газа. В результате сбивается защелка, удерживающая боек, который в нормальном положении находится под воздействием сжатой пружины. Освобожденный боек разбивает стеклянную мембрану и тем самым осуществляет сброс давления.

Электрическая схема силового трансформатора

Внутри корпуса бака размещаются:

- остов с верхней и нижней балкой;
- магнитопровод;
- обмотки высокого и низкого напряжения;
- регулировочные ответвления обмоток;
- низковольтный и высоковольтный отводы
- нижняя часть вводов высокого и низкого напряжения.

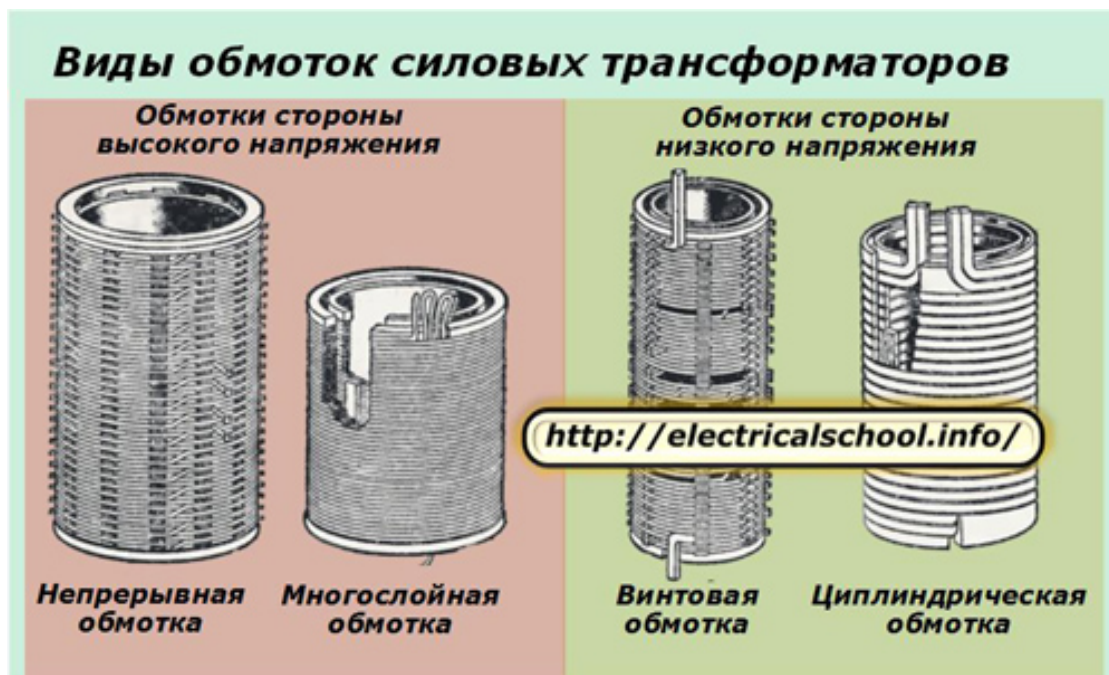
Остов вместе с балками служит для механического закрепления всех составных деталей.

Конструкция внутренних элементов

Магнитопровод служит для снижения потерь магнитному потоку, проходящему через обмотки. Его изготавливают из сортов электротехнической стали шихтованным способом.

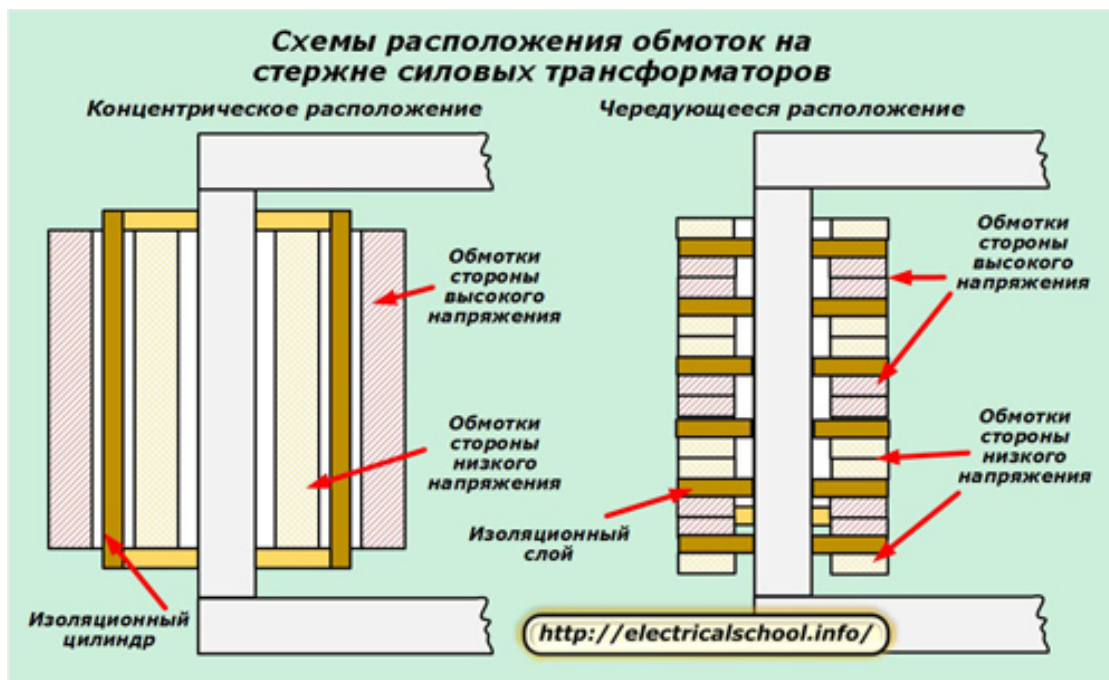
По обмоткам фаз трансформатора протекает ток нагрузки. Материалами для их изготовления выбирают металлы: медь или алюминий с круглым либо прямоугольным сечением. Для изоляции витков используют специальные сорта кабельной бумаги или хлопчатобумажную пряжу.

Концентрические намотанные обмотки выполняют в виде цилиндров, расположенных один в другом. Для стороны высокого напряжения (ВН) создается непрерывная или многослойная обмотка, а для низкого (НН) — винтовая и цилиндрическая.



Обмотку НН располагают ближе к стержню: так легче выполнить слой для ее изоляции. Затем на нее устанавливают специальный цилиндр, обеспечивающий изоляцию между сторонами высокого и низкого напряжения, а на него монтируют обмотку ВН.

Описанный способ монтажа показан на левой части нижерасположенной картинки с концентрическим размещением обмоток на стержне трансформатора.



С правой стороны картинки показан способ размещения чередующихся обмоток, разделенных изоляционным слоем.

Для повышения электрической и механической прочности изоляции обмоток их поверхность пропитывают специальным сортом глифталевого лака.

Для подключения обмоток одной стороны напряжения между собой используют схемы:

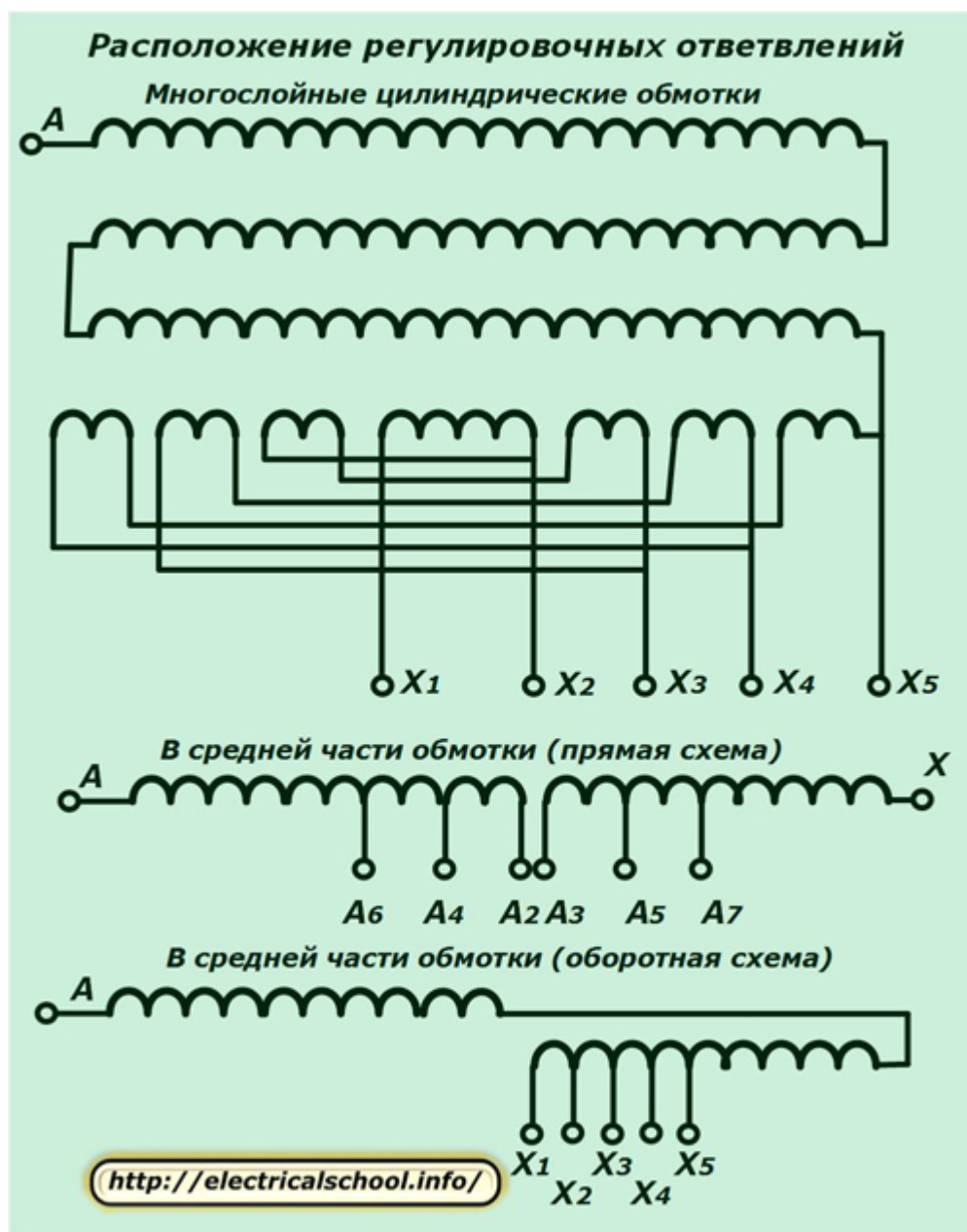
- звезды;
- треугольника;
- зигзага.

При этом концы каждой обмотки маркируют буквами латинского алфавита, как показано в таблице.

Тип трансформатора	Сторона обмотки								
	Низкого напряжения			Среднего напряжения			Высокого напряжения		
	начало	конец	нейтраль	начало	конец	нейтраль	начало	конец	нейтраль
Однофазный	a	X	—	At	Xt	—	A	X	—
Две обмотки три фазы	a	X	0	—	—	—	A	X	0
	b	Y					B	Y	
	c	г					C	Z	
Три обмотки три фазы	a	X		At	Xt		A	X	
	b	Y	0		Yt	0	B	Y	0
	c	Z			Xt		C	Z	

Выводы от обмоток подключают к соответствующим токоотводам, которые монтируются на шпильки проходных изоляторов, расположенных на крышке бака трансформатора.

Для осуществления возможности регулировки величины выходного напряжения на обмотках делают ответвления. Один из вариантов выполнения регулировочных ответвлений показан на схеме.



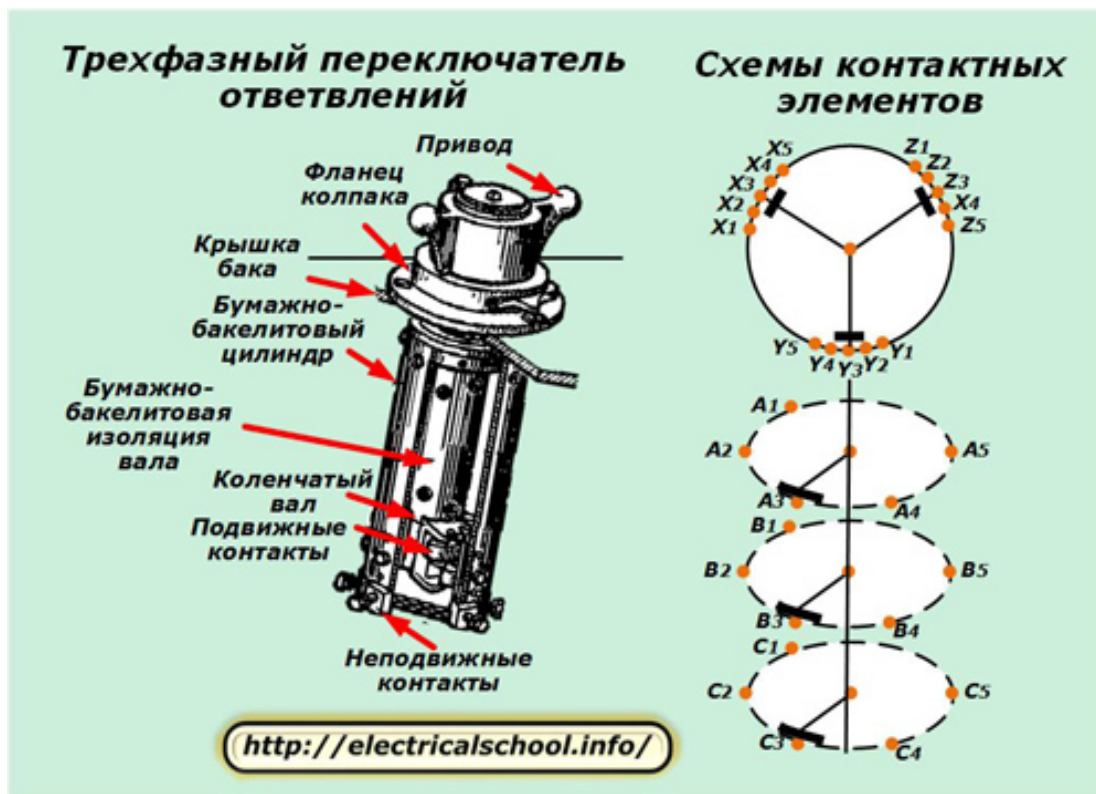
Систему регулирования напряжения создают с возможностью изменения номинальной величины в пределах $\pm 5\%$. Для этого выполняют пять ступеней по 2,5% в каждой.

У мощных силовых трансформаторов регулирование обычно создают на обмотке высокого напряжения. Это упрощает конструкцию переключателя ответвлений и позволяет повышать точность выходных характеристик за счет большего числа витков на этой стороне.

Для многослойных цилиндрических обмоток регулировочные ответвления выполняют на внешней стороне слоя у окончания обмотки и komponуют их симметрично на одинаковой высоте относительно ярма.

У отдельных конструкций трансформаторов ответвления делают в средней части. При использовании обратной схемы одна половина обмотки выполняется с правой намоткой, а вторая — с левой.

Для коммутации ответвлений используют трехфазный переключатель.



У него есть система неподвижных контактов, которые подключены к ответвлениям обмоток, и подвижных, осуществляющих коммутацию схемы за счет создания различных электрических цепей с неподвижными контактами.

Если ответвления сделаны около нулевой точки, то одним переключателем управляют работой сразу всех трех фаз. Это можно делать потому, что между отдельными частями переключателя напряжение не превышает 10% линейной величины.

Когда ответвления выполнены в средней части обмотки, то для каждой фазы используется свой, индивидуальный переключатель.

Способы регулирования выходного напряжения

Существуют два типа переключателей, позволяющие изменять количество витков на каждой обмотке:

1. с отключением нагрузки;
2. под нагрузкой.

Первый способ требует больше времени на выполнение и не пользуется популярностью.

Переключения под нагрузкой обеспечивают более легкое управление электрическими сетями за счет непрерывного электроснабжения подключенных потребителей. Но, для его выполнения необходимо иметь усложненную конструкцию переключателя, который наделяется дополнительными функциями:

- осуществление переходов между ответвлениями без разрыва токов нагрузки за счет подключения двух соседних контактов на момент переключения;
- ограничение тока короткого замыкания внутри обмотки между подключаемыми ответвлениями во время их одновременного включения.

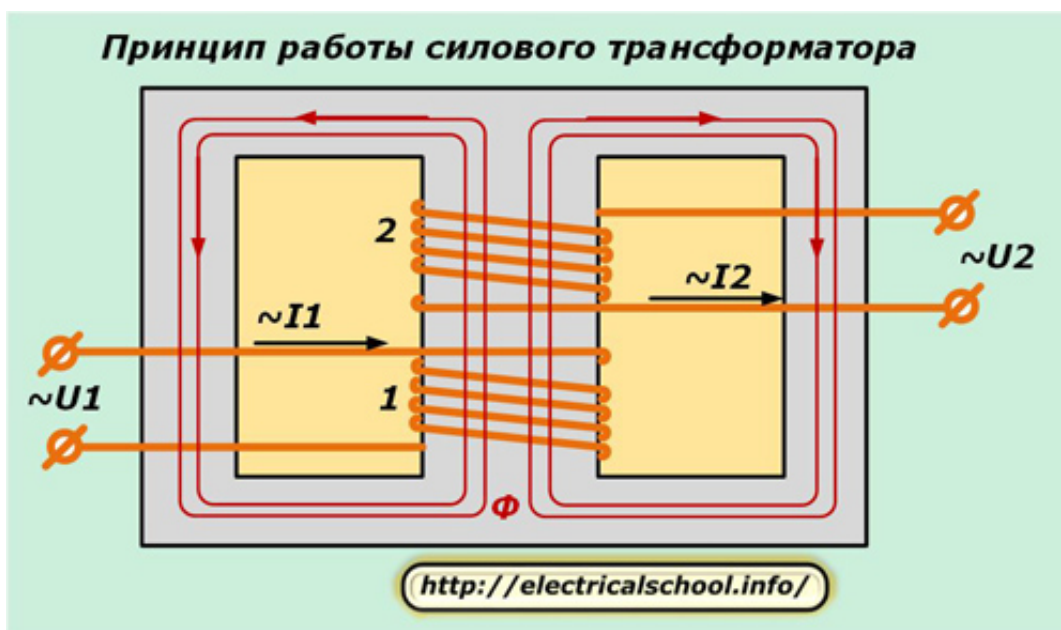
Техническое решение этих вопросов заключается в создании переключающих устройств, работающих от дистанционного управления с применением токоограничивающих реакторов и резисторов.

На фотографии, показанной в начале статьи, у силового трансформатора используется автоматическое регулирование выходного напряжения под нагрузкой за счет создания конструкции АРН, сочетающей релейную схему управления электродвигателя с приводным механизмом и контакторами.

Принцип и режимы работы

В основу работы силового трансформатора заложены те же законы, что и у обычного:

- Проходящий по входной обмотке электрический ток с изменяющейся по времени гармоникой колебаний наводит внутри магнитопровода меняющееся магнитное поле.
- Изменяющийся магнитный поток, пронизывая витки второй обмотки, наводит в них ЭДС.



Режимы работы

При эксплуатации и проверках силовой трансформатор может оказаться в рабочем или аварийном режиме.

Рабочий режим создается подключением источника напряжения к первичной обмотке, а нагрузки — ко вторичной. При этом величина тока в обмотках не должна превышать расчетных допустимых значений. В этом режиме силовой трансформатор должен длительно и надежно питать все подключенные к нему потребители.

Разновидностями рабочего режима являются опыт холостого хода и короткого замыкания, создаваемые для проверок электрических характеристик.

Холостой ход создается размыканием вторичной цепи для исключения протекания в ней тока. Он используется для определения:

- КПД;
- коэффициента трансформации;
- потерь в стали на намагничивание сердечника.

Опыт короткого замыкания, создается шунтированием накоротко выводов вторичной обмотки, но с заниженным напряжением на входе в трансформатор до величины, способной создать вторичный номинальный ток без его превышения. Этот способ используют для определения потерь в меди.

К аварийным режимам трансформатора относятся любые нарушения его работы, приводящие к отклонению рабочих параметров за границы допустимых для них значений. Особенно опасным считается короткое замыкание внутри обмоток.

Аварийные режимы приводят к пожарам электрооборудования и развитию необратимых последствий. Они способны причинить огромный ущерб энергосистеме.

Поэтому для предотвращения подобных ситуаций все силовые трансформаторы снабжаются устройствами автоматики, защит и сигнализации, которые предназначены для поддержания нормальной работы первичной схемы и быстрого отключения ее со всех сторон при возникновении неисправностей.

3. РАЗЪЕДИНИТЕЛИ

Среди электрического оборудования высокого напряжения используются различные коммутационные аппараты. Одна из их групп получила название «Разъединители».

Назначение

Эти конструкции используются для создания такого разрыва в электрической схеме, который не только исключает подачу напряжения, но и должен быть виден визуально.

Дело в том, что за всю многолетнюю историю эксплуатации электроэнергии сложились традиции безопасного ее использования. Отключения электричества выключателями нагрузки со сложными техническими устройствами скрыты от наблюдения. В случае возникновения у них поломок напряжение остается на участке, предназначенном для вывода из работы. Это очень опасно и является прямой предпосылкой для поражения людей электрическим током или выводу электротехнического оборудования из строя.

По этим причинам разъединители монтируют в высоковольтной схеме последовательно с выключателями и, как правило, после них для обеспечения безопасности производства работ.

Для понимания этого процесса представим участок электрической схемы, когда электроэнергия от источника на трансформаторной подстанции №1 передается по линии электропередач, разделенной на 5 рабочих участков к подстанциям №2 и №3.

Местоположение разъединителя в электрической схеме



Допустим, что на участке №3 (выделен красным цветом) возникла необходимость проведения технических работ, требующих по условиям безопасности снятия напряжения.

Для этого потребуется выполнить отключения силовых выключателей:

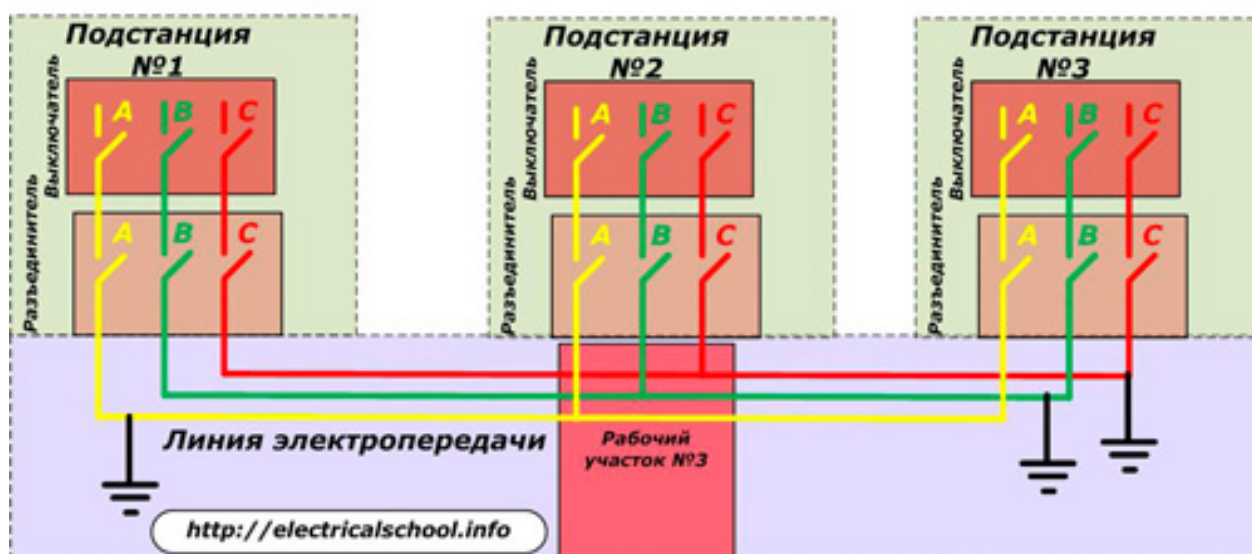
- питающей подстанции №1;
- потребляющих подстанций №2 и №3, которые находятся в работе по стороне нижнего напряжения и будут генерировать электроэнергию на линию, включая участок №3, за счет эффекта обратной трансформации.

При любой неисправности одного из выключателей или ошибочном либо их самопроизвольном несанкционированном включении на рабочем участке №3 появится напряжение, а это недопустимо.

Поэтому в электрическую схему после каждого выключателя смонтирован разъединитель, который дополнительно создает безопасный и видимый разрыв цепи.

Представленная выше картинка выполнена в упрощенном однолинейном исполнении. Однако, на практике высоковольтные линии электропередач используют минимум три фазы. Более точная схема для нашего случая подготовки рабочего участка №3 к техническому обслуживанию будет иметь следующий вид.

Схема подготовки рабочего участка №3 к допуску бригады



На ней каждая фаза «А», «В», «С» линии электропередачи показана своим цветом: желтым, зеленым и красным. На всех подстанциях она разрывается вначале своим выключателем, а затем — разъединителем. Только после этого каждая фаза линии электропередачи для участка №3 заземляется.

На этом рисунке вопрос заземления показан не полностью, а только для демонстрации необходимости его выполнения.

Место расположения разъединителя в схеме определяет его упрощенную конструкцию по сравнению с силовым выключателем нагрузки. Это

объясняется тем, что выключатель должен надежно разрывать проходящую через него электроэнергию в нормальном режиме работы и аварийные токи коротких замыканий огромных величин, которые могут возникнуть в непредвиденный момент времени в любом месте участка схемы, защищаемого выключателем.

Такие процессы очень сложные. Они связаны с ионизацией окружающей среды и возникновением мощной электрической дуги, которая может сжечь контакты. Для предотвращения этого явления используют различные технические решения, основанные на применении сред с изоляционными свойствами. Ими наполняют рабочую область выключателя, в которой производится разрыв цепи.

Второе направление борьбы с дугой – это обеспечение максимального быстродействия отключающего механизма. Время его работы сопоставимо со взрывом и происходит примерно за два периода колебания гармоники синусоидального тока.

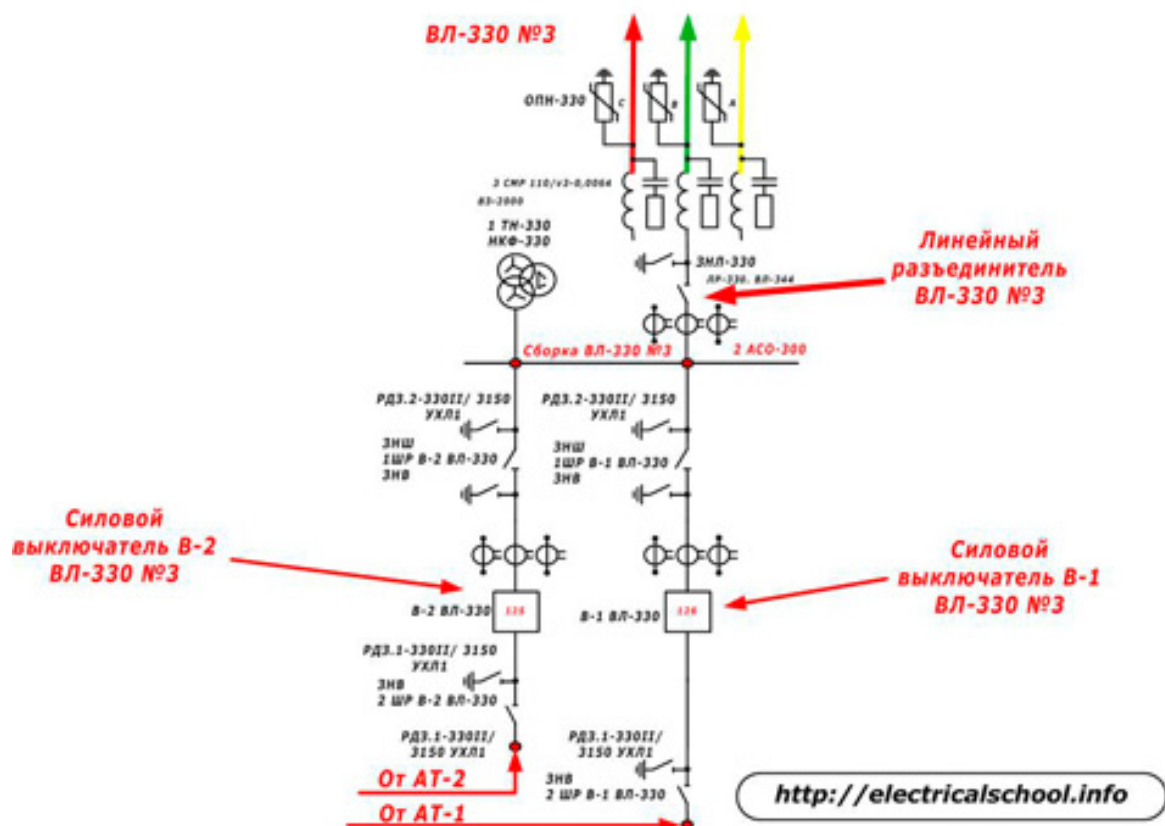
Столько же времени требуется современным защитами со средствами автоматики для выявления неисправности в схеме и подачи команды на исполнительный элемент выключателя.

Поэтому время отключения аварийных ситуаций защитами и автоматикой составляет порядка 0,04 сек.

Для разъединителей такие сложные устройства не нужны. Они спроектированы для отключения руками оператора или электродвигателями приводов без спешки. Поскольку разъединители устанавливаются после выключателей, то ими оперируют исключительно после снятия напряжения, когда электрической дуги быть не может.

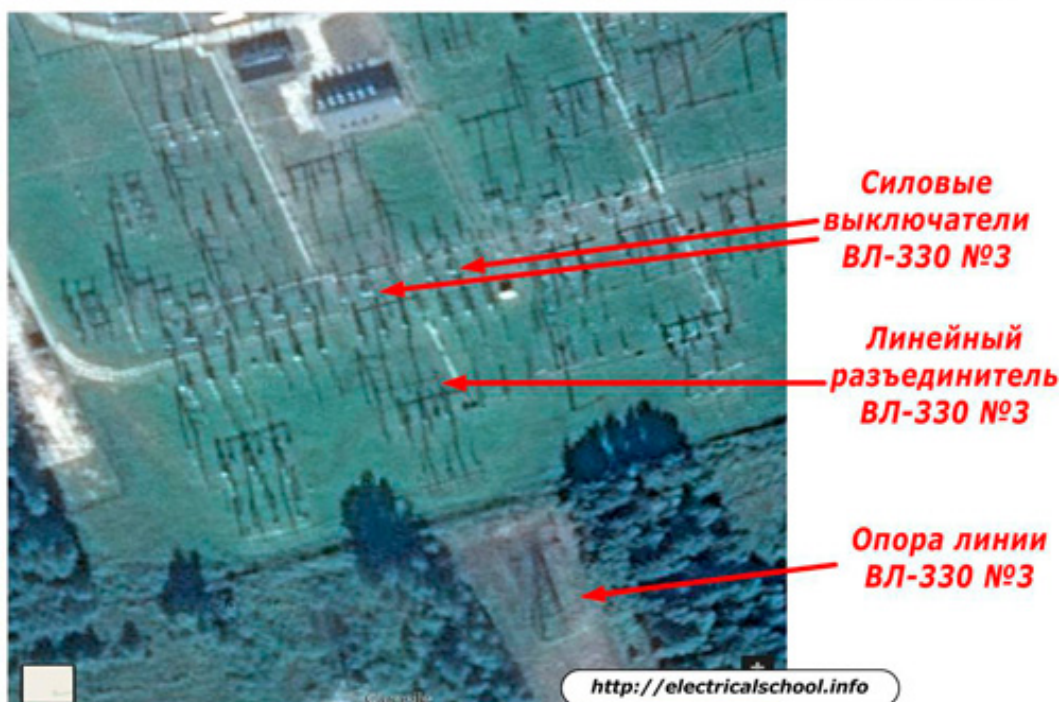
Место расположения разъединителя и выключателя можно посмотреть на фрагменте оперативной схемы диспетчера.

Упрощенный фрагмент оперативной однолинейной схемы участка подстанции с линейным разъединителем и выключателями линии 330 кВ



Так выглядит фотография участка этой подстанции, переданная со спутника.

Вид со спутника на силовые выключатели и линейный разъединитель



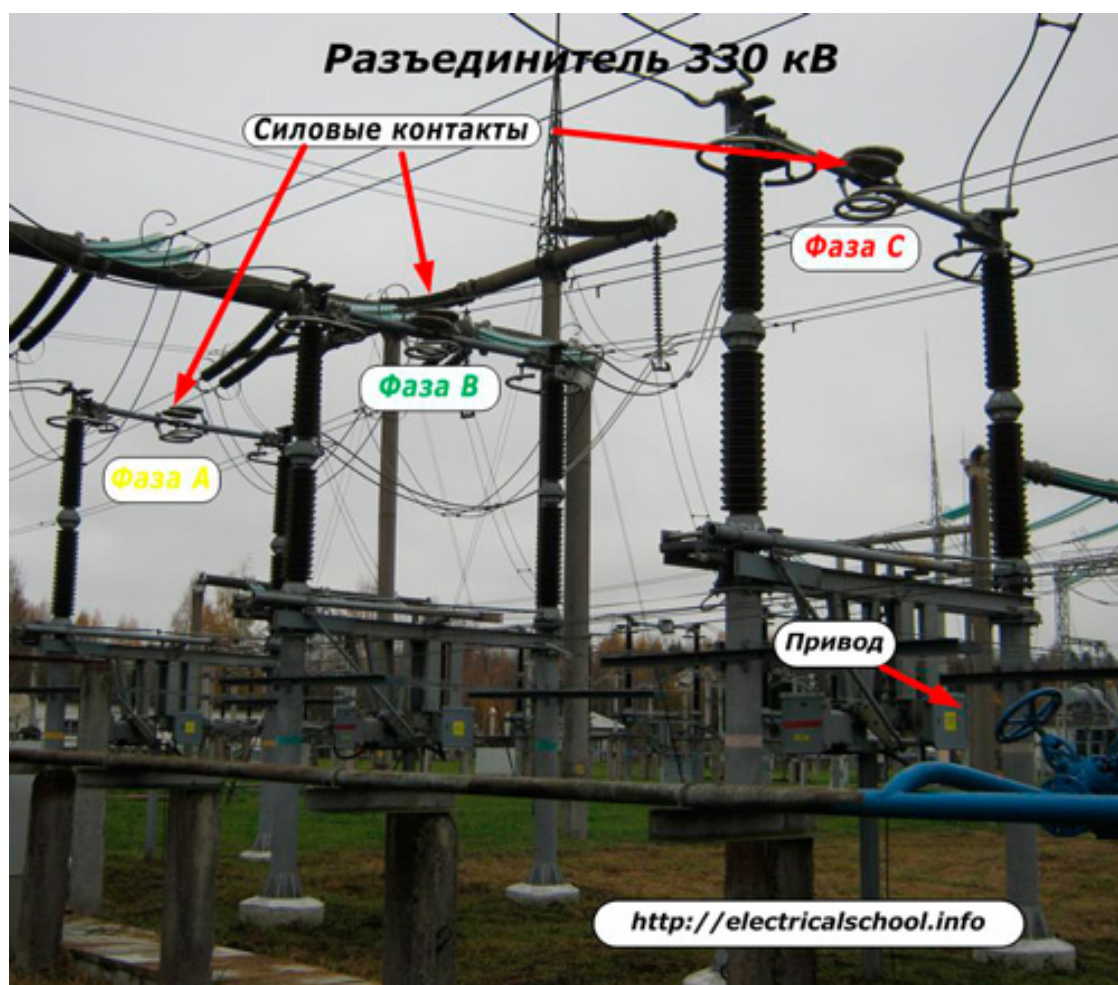
Вид на этот же участок местности с земли со стороны вводной опоры.



Таким образом, разъединителями создают видимый разрыв электрической цепи для ее безопасного технического обслуживания после того, как выключателем нагрузки снято напряжение. Это их основное назначение.

Конструкция разъединителей

Устройство высоковольтного разъединителя довольно сложное, но в то же время оно намного проще, чем у силового выключателя такого же напряжения. Рассмотрим примеры их исполнения для оборудования 330 кВ.



Единственные токи, которые отключают подобные разъединители — это возможные емкостные разряды, образуемые наведенным напряжением. На разрыв их мощности и рассчитаны силовые контакты разъединителей. В рабочем состоянии через них проходит максимальный ток нагрузки.

Для оперирования каждой фазой разъединителя по отдельности или в комплексе предназначены шкафы управления приводами.



Если внимательно посмотреть на приведенные фотографии, то видно, что коммутационные контакты выключателя и разъединителя расположены на значительной высоте. Это сделано из соображений безопасности для остального оборудования и обслуживающего эксплуатационного персонала.

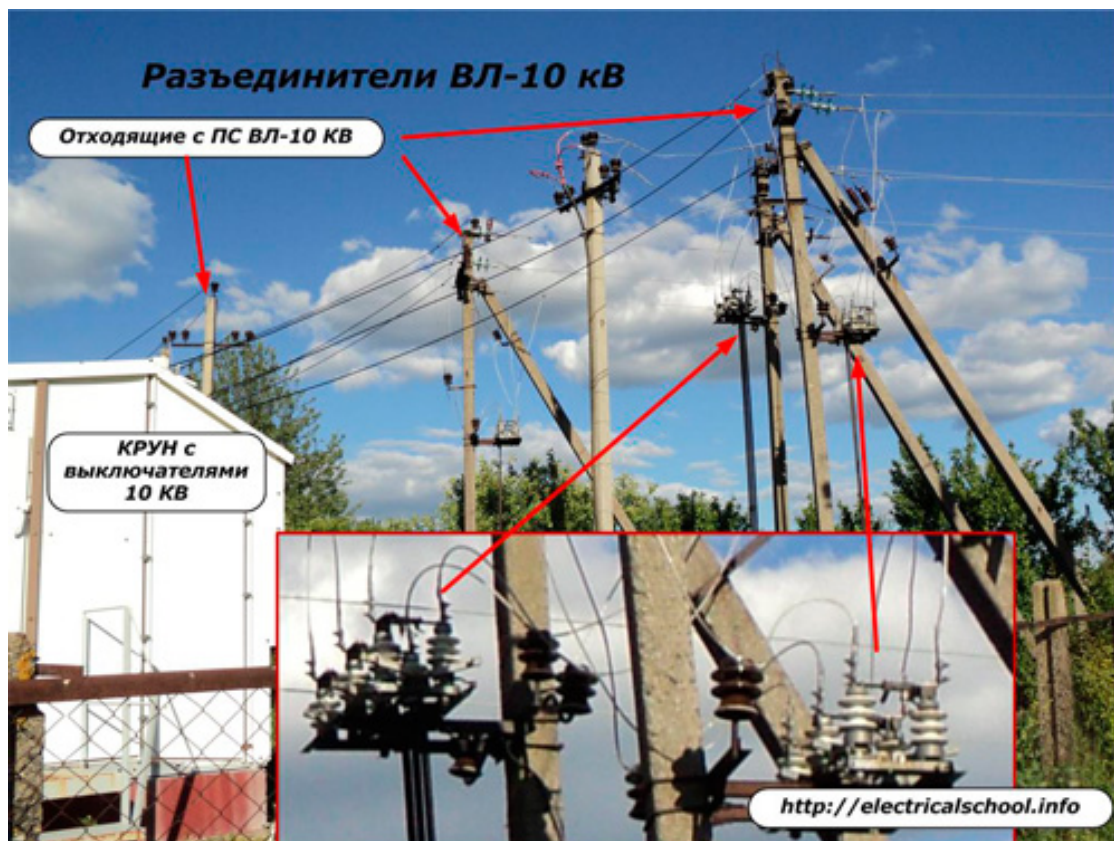
На ОРУ-110 кВ безопасная высота расположения разъединителя меньше.



Так лучше их обслуживать, проще и дешевле монтировать. Однако, это требует от обслуживающего персонала, находящегося под введенным в работу разъединителем, повышенного внимания. На практике встречались случаи, когда работники в сырую погоду поднимали вверх косу, сокращая безопасное расстояние до электрооборудования и попадая под напряжение 110 кВ.

Это лишний раз подтверждает, что технику безопасности необходимо не только досконально знать, но и безукоризненно выполнять.

Месторасположение разъединителей воздушных ЛЭП 10 кВ на опорах около крытого распределительного устройства с силовыми выключателями подстанции показано на фотографии ниже.



На следующей снимке виден способ управления разъединителем линии 10 кВ с помощью ручного привода. Питающий трансформатор находится рядом.



Разъединители воздушных линий на 6 кВ имеют такое же устройство, как и для линий 10 кВ.



На всех приведенных фотографиях видно, что любой разъединитель состоит из следующих конструктивных элементов:

- силовой рамы, размещенной на безопасной высоте;
- опорных изоляторов, жестко смонтированных на раме по концам образуемого разрыва для каждой фазы;
- контактной системы, обеспечивающей надежное прохождение номинального тока линии и исключающей в разомкнутом состоянии подачу напряжения на участок, выделенный для обслуживания;
- системы управления перемещением ножей.

У разъединителей, используемых для цепей с напряжением 110 кВ и выше, контактная система выполнена из двух подвижных полуножей, которые разводятся в противоположные стороны. В остальных конструкциях чаще используется один подвижный нож, вводимый в неподвижно закрепленный контакт.

Разъединители классифицируют по:

- количеству полюсов;
- характеру установки (внутренней или наружной);
- виду движения ножа для создания разрыва цепи (поворотного, рубящего либо качающегося типа);

- способам управления: вручную оперативной изоляционной штангой или системой рычагов либо автоматически электродвигателями (может использоваться гидравлика и даже пневматика) с системой управления.

Все операции с разъединителями в работающей схеме относятся к опасным работам, их выполняет только обученный и подготовленный персонал по специально оформленным бланкам под непосредственным контролем диспетчера.

Блокировка разъединителей

Особенностью высоковольтных разъединителей является то, что вместе с ними на одной платформе часто располагают заземляющие ножи с обеих сторон создаваемого разрыва. Ими удобно манипулировать оперативному персоналу, выполняющему переключения в схемах электроснабжения.

При переключениях важно правильно соблюдать очередность наложения/снятия заземления и включения/вывода из работы разъединителя. Нельзя включать силовой выключатель при установленном заземлении с любой стороны разъединителя. Это приведет к возникновению короткого замыкания.

Также нельзя накладывать заземления при включенном разъединителе и поданном напряжении на схему, что тоже создаст КЗ.

С целью недопущения при переключениях ошибочных ситуаций используется техническая блокировка действий оперативного персонала со стационарными заземлителями, разъединителями и выключателями. Она может быть:

- чисто механической;
- электрической (на основе использования электромагнитного замка);
- комбинированной.

Конструкции блокировок бывают разными. Их сложность и надежность увеличивается с повышением величины напряжения, используемого в первичной схеме.

Для управления электрическими видами блокировок на валах поворота контактных ножей монтируют дополнительные контакты, используемые во вторичных цепях. Их называют блок контактами КСА. Они полностью повторяют положение разъединителя, одновременно с ним замыкаются или размыкаются. С целью расширения возможностей схем управления, защит и автоматики выключателей и линий эти блок контакты создают как с нормально открытым, так и закрытым положением.

На приводах стационарных заземляющих ножей и выключателей нагрузки тоже монтируются аналогичные блок контакты.



Схемы управления электромагнитной блокировкой построены на принципе создания последовательных и параллельных цепочек электрических схем из контактов повторителей положения первичного оборудования: выключателей, разъединителей, заземляющих ножей.

Когда положение одного из этих коммутационных аппаратов изменяется оперативным персоналом, то соответственно происходит переключение их вторичных контактов, собранных по определенной логической схеме. Если при этом нарушаются требования безопасности, то электромагнитная блокировка запрещает дальнейшие действия с силовым оборудованием.

В этом случае необходимо разбираться с правильностью выполненных действий и искать допущенную ошибку.

Схемы оперативной блокировки разъединителей на подстанциях питаются от специальных источников напряжения постоянного тока.

Обязательные требования к разъединителям:

- обеспечение видимого разрыва;
- устойчивость конструкции к динамическому и термическому воздействию;
- надежность изоляции при любых атмосферных явлениях;
- четкость работы при ухудшении условий эксплуатации в дождь, снегопад, образованиях наледи;
- простота конструкции, обеспечивающая удобство эксплуатации и обслуживания.

4. ОТДЕЛИТЕЛИ И КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ

В нашей стране эксплуатируется много подстанций 110/35/10 или 110/10 (110/6) кВ. Одна из них представлена на фотографии, полученной с искусственного спутника Земли.



Выполненные красным цветом надписи на ней поясняют назначение каждого объекта.

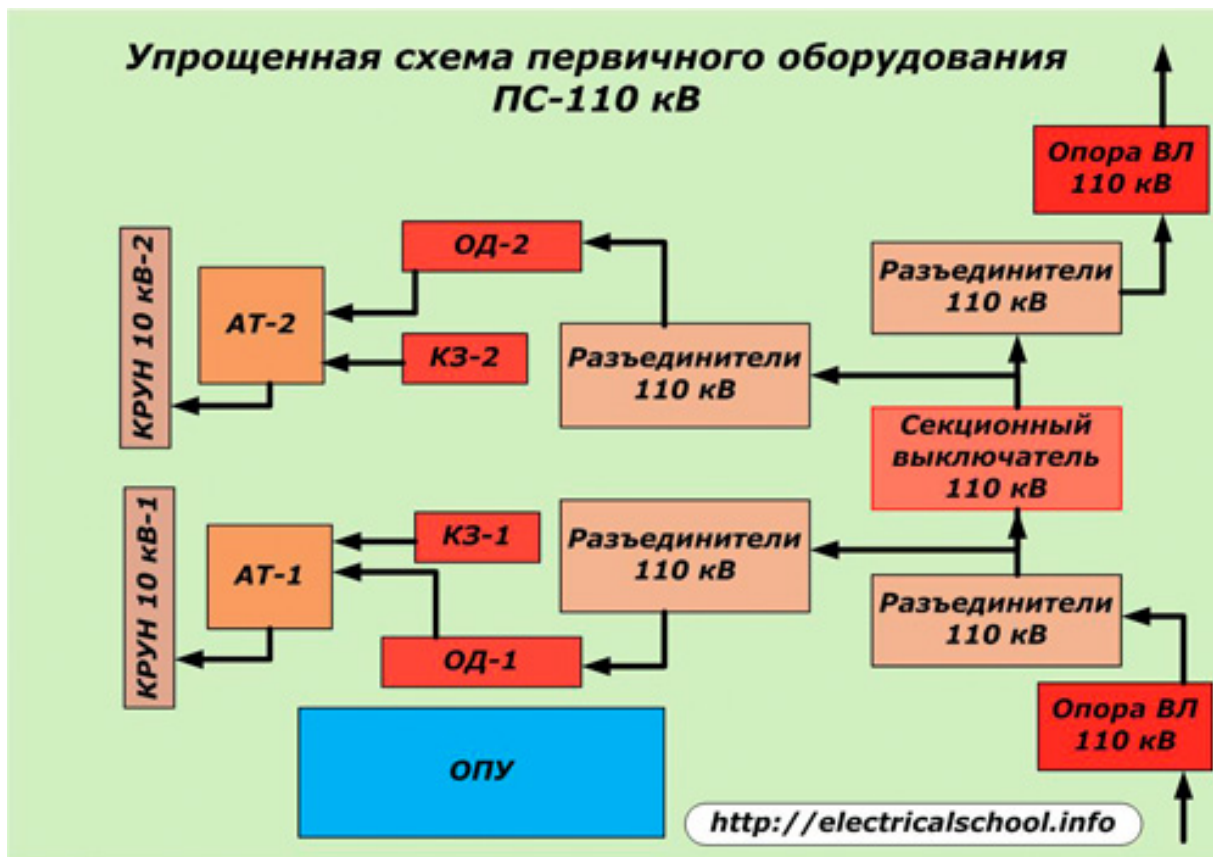
Эта же подстанция показана на фотографии, сделанной с земли.



От нее по воздушным и кабельным линиям питаются трансформаторные устройства 10 кВ, которые понижают выходное напряжение до 380 вольт для

электроснабжения жилых зданий и промышленных предприятий в населенных пунктах.

Упрощенная картина размещения первичного оборудования этой подстанции представлена блочной схемой.



Здесь наглядно видно месторасположение отделителей (ОД-1 и ОД-2) с короткозамыкателями (КЗ-1 и КЗ-2), которые подключены проводами ЛЭП в разрыв между удаленным выключателем питающей подстанции и силовыми автотрансформаторами рассматриваемой.

В нашем примере работают два автотрансформатора (АТ-1 и АТ-2). Они запитаны от одной проходящей мимо подстанции воздушной линии 110 кВ через секционный выключатель, с которым соединяются системой разьединителей.

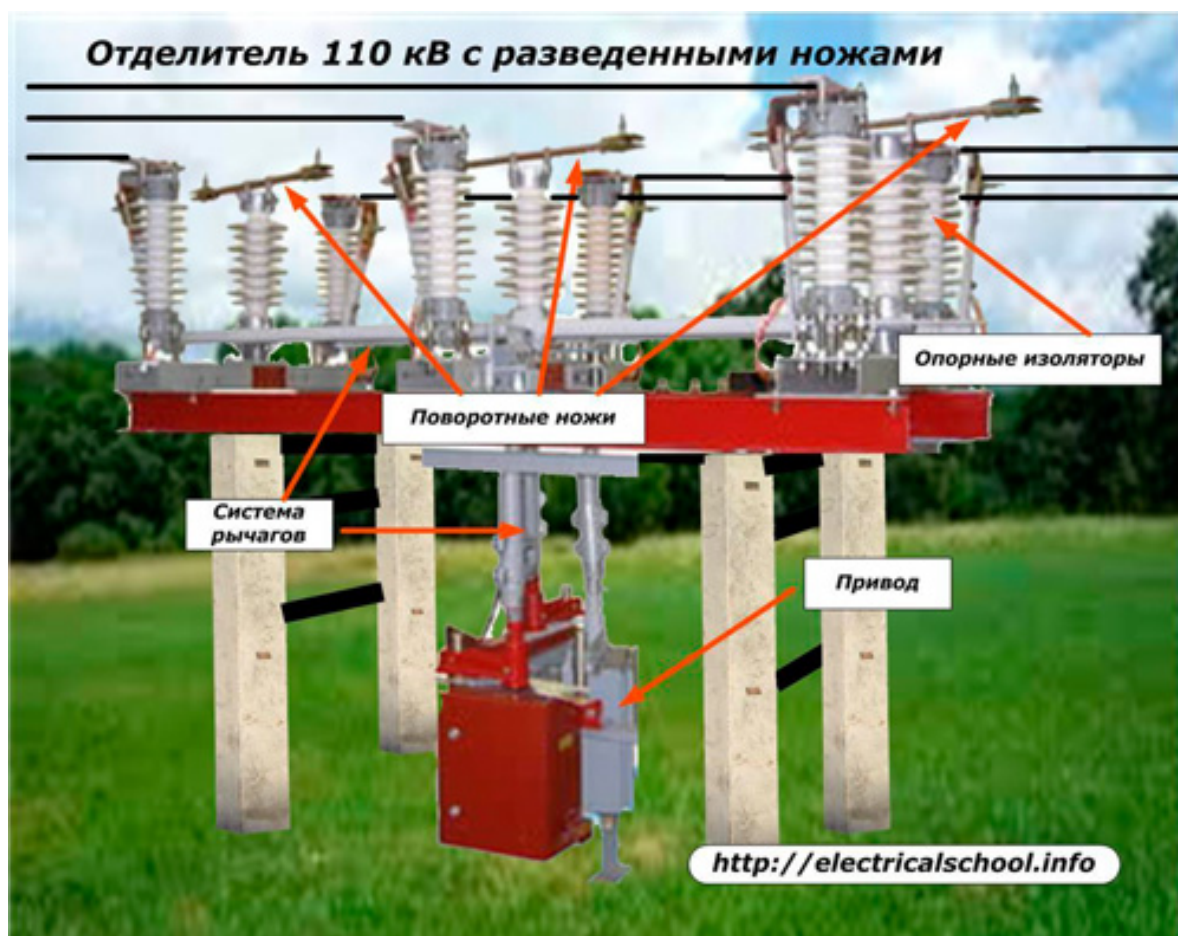
Каждый из автотрансформаторов питает через свой вводной выключатель собственную систему шин 10 кВ, используемую для отходящих линий. Все их выключатели расположены в сооружении КРУН-10 кВ (комплектное распределительное устройство наружной установки).

На картинке голубым цветом показано здание ОПУ – общеподстанционного пункта управления, внутри которого размещены устройства сложных релейных защит, автоматики, средств измерения, элементов управления силовым оборудованием.

Такие подстанции по воздушным ЛЭП протяженностью до 100 км соединяются с питающей их ПС. Электроэнергия от удаленного источника поступает через силовой автоматический выключатель нагрузки, расположенный на ОРУ-110 кВ и оборудованный системой защит, автоматики и управления.

Как устроен и работает отделитель

В соответствии с названием его роль связана с отделением части электрической схемы, на которой возникла неисправность, от основной питающей линии.



На картинке показан отделитель — электротехнический аппарат для коммутации (отделения) электрических цепей без нагрузки и напряжения сразу во всех трех фазах линии. Контакты его ножей во включенном положении плотно прилегают между собой и обеспечивают минимальное переходное сопротивление для длительного прохождения электрического тока в номинальном режиме электроустановки.

Однако, они не имеют устройств гашения дуги, а привод не обеспечивает быстрое отключение и не имеет защит, как автоматический выключатель. По этим причинам отделителем запрещено разрывать ток нагрузки или подавать напряжение на схему. В логику его автоматической работы обязательно

включается блокировка от проходящих через него токов нагрузки. Для ее работы установлен специальный трансформатор тока, питающий отдельную релейную схему.

Опорные изоляторы отделителя размещены на металлической раме, поднятой бетонными столбами на безопасную высоту. На этих изоляторах смонтированы стационарные контакты и поворотные ножи, соединенные системой рычагов с приводом, который может управляться:

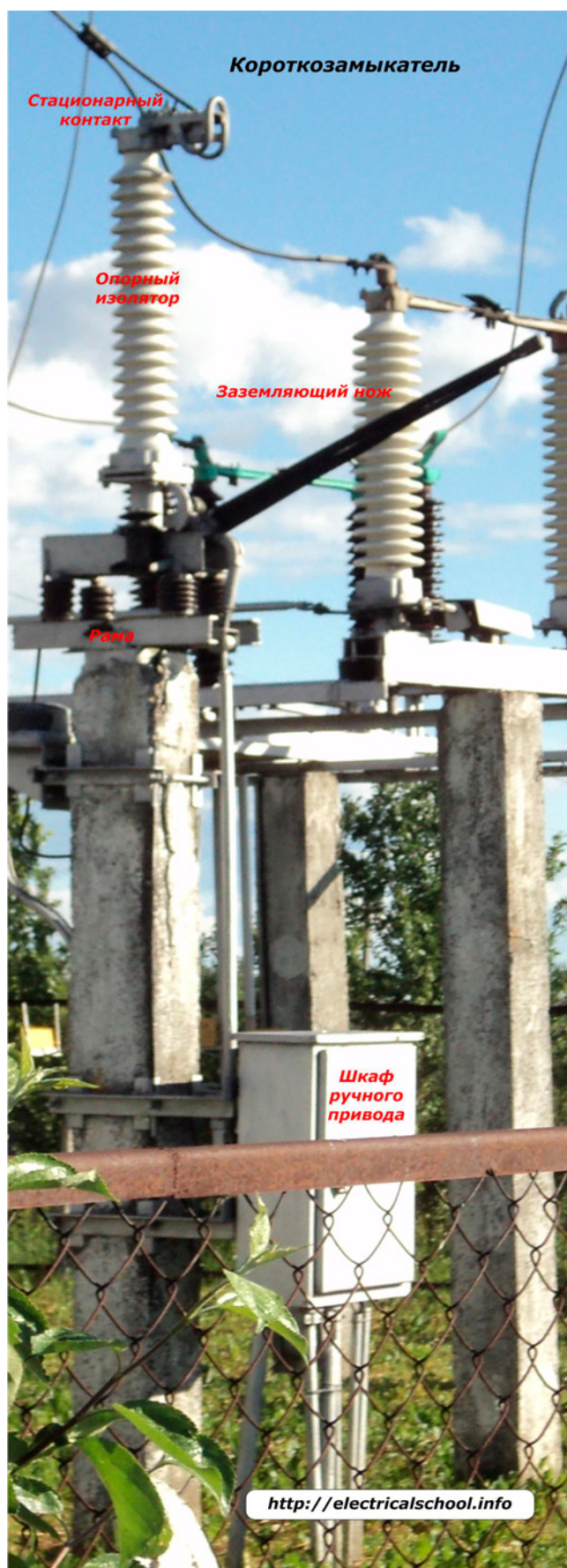
- автоматически для отделения защищаемой цепи от возникающих аварий разведением ножей во время создания бестоковой паузы;
- вручную оперативным персоналом, для включения ножей и завода пружин отключения, приведения их в готовность к работе.

Автоматическое разделение схемы происходит за счет использования энергии взведенной пружины, усиленной электромотором. Она срабатывает при выводе из зацепления защелки электромагнитом катушки отключения. Когда от защит трансформатора подается напряжение на эту катушку, то поворотные ножи разрывают схему.

На валу отделителя размещены блок-контакты КСА, повторяющие его положение. Они используются во вторичных цепях:

- защит;
- сигнализации;
- автоматики.

Как устроен и работает короткозамыкатель



Это тоже электротехнический коммутационный аппарат, работающий в цепях 6 или 10 кВ. Со стороны подвижного поворотного ножа он надежно заземлен на контур подстанции, а на противоположном конце стационарного контакта подключен тоководом к одной фазе линии. Рубящий рабочий нож короткозамыкателя в нормальном положении отведен на безопасное расстояние от фазы, исключающее случайное перекрытие ее напряжения на землю.

Стационарный контакт постоянно находится под потенциалом линии и отделен от контура заземления сопротивлением опорного изолятора. Вся эта конструкция смонтирована на прочной металлической раме и поднята на безопасное расстояние от земли.

Управление короткозамыкателем осуществляется через рычажную систему. В ручном режиме подвижный нож отводится оперативным персоналом от стационарного контакта в положение готовности к срабатыванию. При этом взводится силовая пружина. Одновременно переключаются блок контакты КСА, повторяющие его положение для работы вторичных цепей.

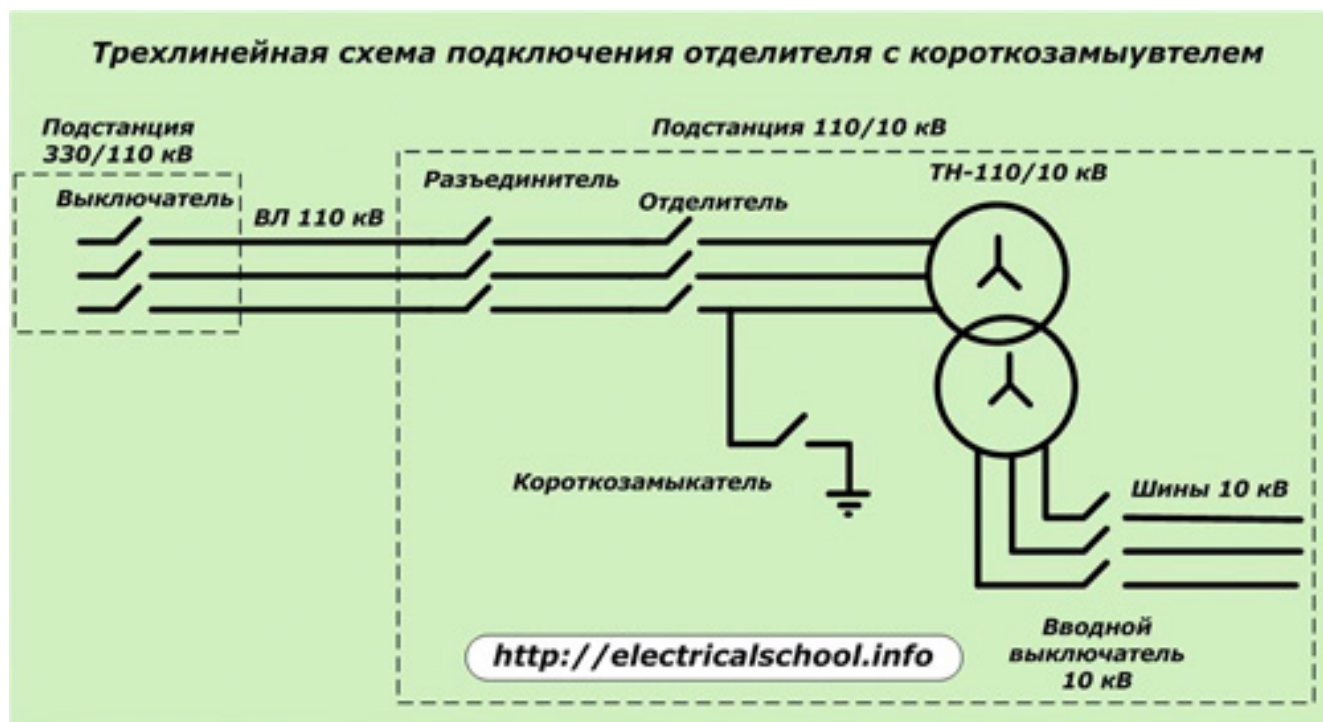
При определении защитами неисправностей в схеме на электромагнит катушки отключения подается напряжение. В результате этого защелка пружины выбивается из зацепления и приложенным к системе рычагов крутящим моментом подвижный нож резко набрасывается на стационарный контакт. На фазе линии возникает искусственно созданное короткое замыкание с землей.

Конструкция короткозамыкателя рассчитана на прохождение через его нож и контакты аварийных токов, создаваемых при КЗ с учетом восприятия термического удара. Она выдерживает эти токи за время их прохождения от момента возникновения до снятия напряжения защитами удаленного выключателя.

Короткозамыкатели используют в сетях с заземленной или изолированной нейтралью. В первом случае их устанавливают на одну фазу, а во втором на две для обеспечения надежного замыкания.

Особенности логики работы отделителя и короткозамыкателя

Электрическая схема подключения короткозамыкателя и отделителя для одного трансформатора ПС в трехлинейном исполнении показана на схеме.

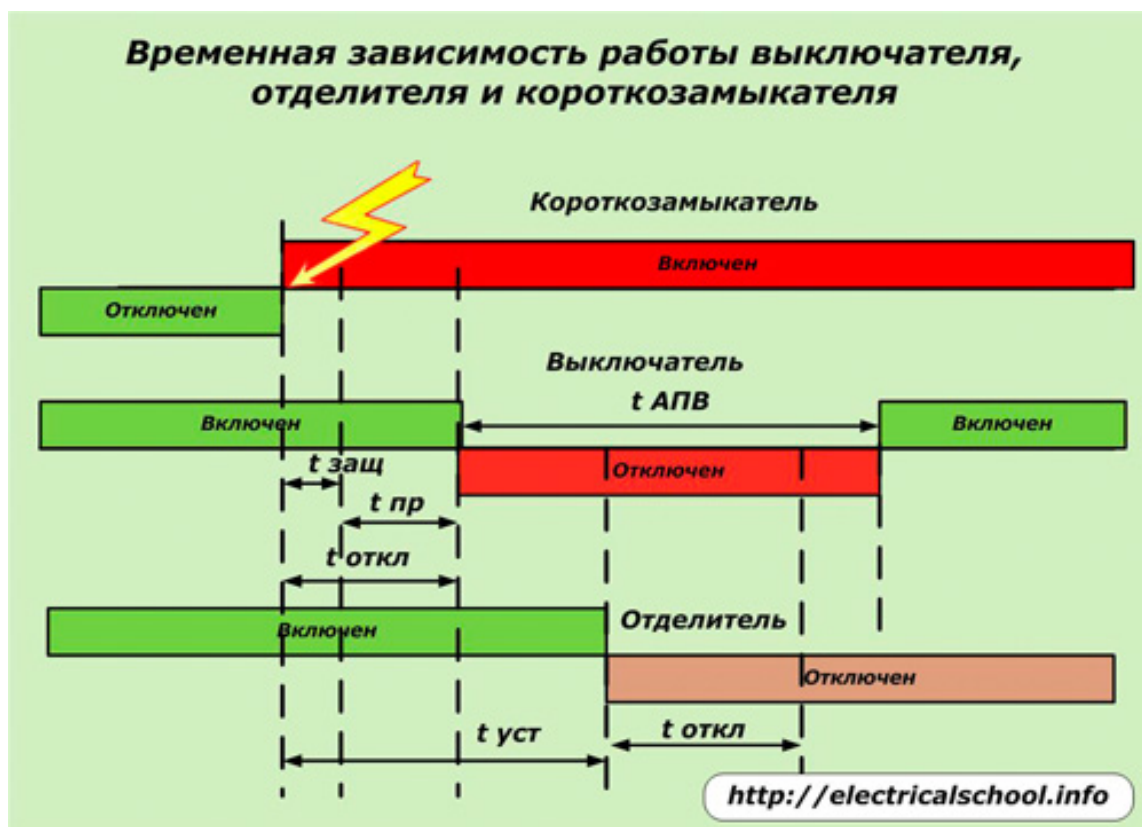


При рабочем режиме электроэнергия от питающей подстанции по ВЛ поступает через включенные разъединитель с отделителем на сторону высокого напряжения ТН, где трансформируется в 10 кВ. А далее она через вводной выключатель распределяется по потребителям.

Здесь видно, что на подстанции 110/10 кВ отсутствует выключатель нагрузки. На ней нет ни одного коммутационного аппарата, способного отключить напряжение с трансформатора при возникновении в нем повреждений или для производства оперативных переключений.

Эта задача возложена на выключатель удаленной подстанции. К примеру, для вывода в плановый ремонт ТН 110/10 кВ, диспетчер ПС-330 по команде снимает напряжение со всей питающей ВЛ-110 ручным отключением выключателя. После этого разводятся ножи разъединителя.

Когда в схеме ТН 110/10 кВ возникает повреждение, то его отключает удаленный выключатель по следующему алгоритму.



Защиты трансформатора выявляют неисправность, анализируют и выдают напряжение на электромагнит катушки наложения короткозамыкателя. Его подвижный нож импульсом вбрасывается на контакт фазы. (Этот момент показан знаком молнии желтого цвета на временной шкале графика.) На ВЛ-110 появляется однофазное КЗ на землю.

Токовые защиты выключателя (например, дифференциально фазная или направленная токовая нулевой последовательности) чувствуют эту неисправность, анализируют и через время $t_{\text{защ}}$ выдают исполнительную команду на срабатывание привода, который за время $t_{\text{пр}}$ отключается.

Таким образом, время снятия напряжения с трансформатора определяется:

- продолжительностью работы его защит;
- длительностью импульса наложения короткозамыкателя;
- скоростью отключения однофазного замыкания выключателем на удаленной подстанции, формирующей время $t_{\text{откл}}$.

Однако, на этом логика взаимодействия защит, расположенных на разных подстанциях, не заканчивается. Схема управления выключателем с момента его отключения выдает команду на его автоматическое повторное включение через установленное для этого случая время $t_{\text{АПВ}}$. Оно заранее выставляется уставкой автоматики. Во время его действия выключатель отключен, а ВЛ обесточена и находится без напряжения. Таким способом создается бестоковая пауза в электроснабжении.

После окончания выдержки времени АПВ воздушная ЛЭП снова запитывается. К этому моменту однофазное КЗ должно быть устранено действием отделителя. Он работает от защит трансформатора, которые выдают одновременно две команды на его отключение и наложение короткозамыкателя. Только действие команды на отделитель задерживается уставкой времени $t_{уст}$, выставленной на релейной схеме защит трансформатора.

Время работы привода отделителя учитывается продолжительностью действия АПВ выключателя так, чтобы создать небольшой запас для его надежной работы.

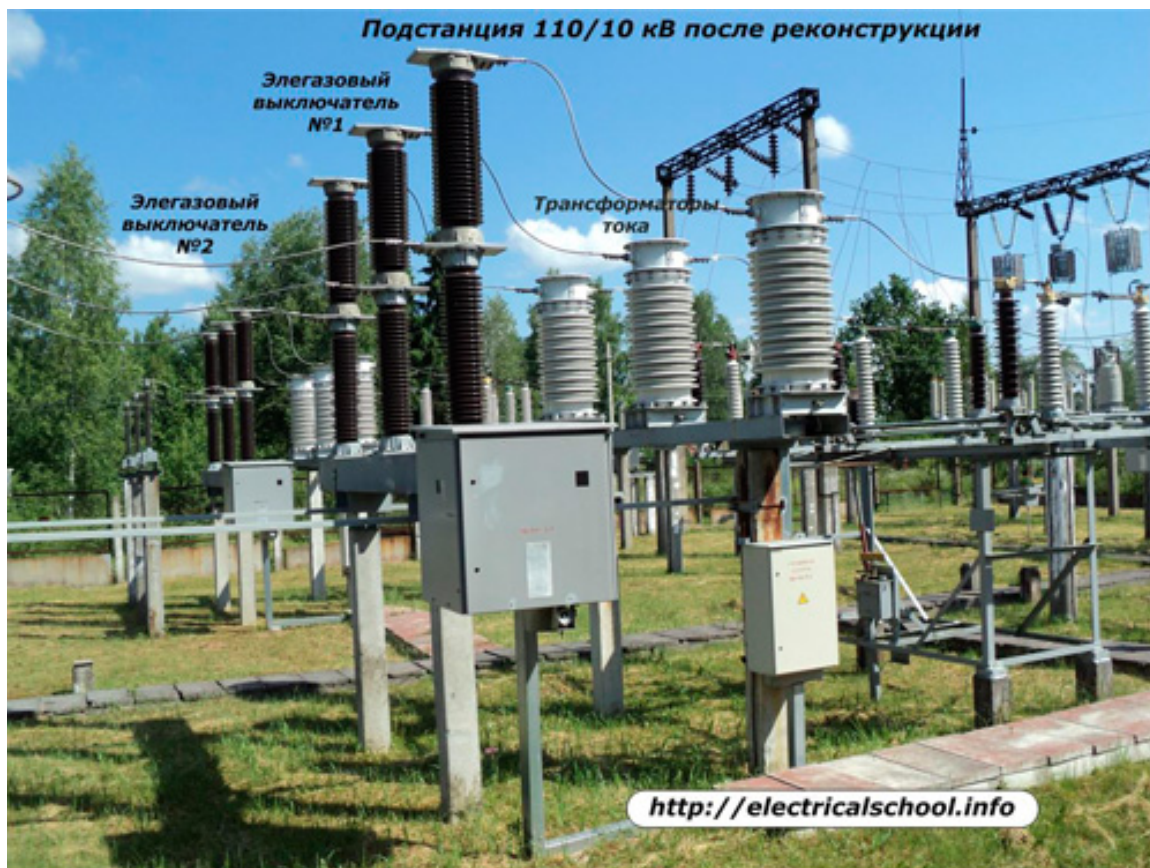
Таким образом, после включения выключателя короткозамыкатель остается в наложенном на фазу линии положении, но при этом отделен от поданного на нее напряжения отключенным отделителем. При этом трансформатор остается обесточенным со стороны высокого напряжения и может быть введен в работу оперативным персоналом только после анализа происходящих на нем процессов и ликвидации возникшей неисправности, на что требуется определенное время.

Перспективы использования схем с отделителем и короткозамыкателем

Подстанции, на которых работает такая система, широко использовались в прошлом, когда установка воздушных или масляных выключателей требовала дополнительного вспомогательного и сложного оборудования (компрессорных либо масляных станций), что было экономически не выгодно.

Отделитель работает на открытом воздухе, подвергается действию любых атмосферных осадков. Его условия эксплуатации значительно ухудшаются зимой при мокром снегопаде и последующих заморозках.

Сейчас такие подстанции подвергаются реконструкции. На них и на всех строящихся современных ОРУ-110 вместо отделителя и короткозамыкателя устанавливают элегазовый выключатель. Его привод работает от энергии взведенной электродвигателем пружины, а небольшого запаса элегаза, закачанного в баллон малой емкости, достаточно для гашения дуги, что обеспечивает длительный ресурс его срабатываний.



5. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Современная энергетика работает с огромными энергетическими потоками, передаваемыми по высоковольтным линиям электропередач.



Транспортируемая в рабочем режиме по проводам ВЛ-330 кВ энергия, показанная на левой картинке, исчисляется мощностью в несколько гигаватт. ($1\text{ГВт}=1000\text{МВт}=10^9$ ватта).

Мощность современного тепловоза, тянущего железнодорожный состав на правой картинке, составляет порядка 6 тысяч лошадиных сил или 4,4

мегаватта, что в 1000 раз меньше значения передаваемой по воздушной ЛЭП электроэнергии.

На практике довольно часто возникают ситуации, когда необходимо прекратить оба этих процесса: отключить поток электричества или внезапно остановить поезд. Сделать это довольно сложно. Кинетическую энергию движущегося железнодорожного состава потребуется погасить торможением всех его колес о рельсы или созданием мощного препятствия на пути, например, в виде встречного поезда.

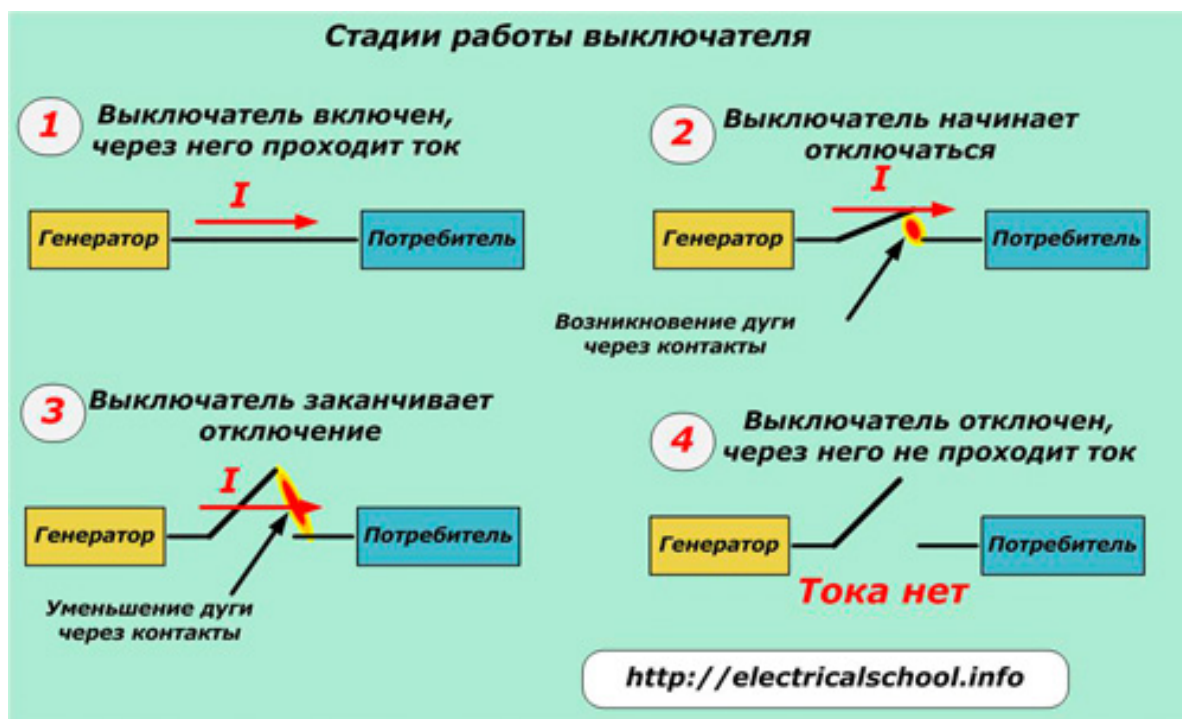
Другими словами, для быстрой остановки локомотива потребуется отключить работу его двигателя и приложить мощность, направленную противоположно движению по инерции, но эквивалентную по величине.

Аналогичные процессы происходят в энергетике. Только при передаче электричества движутся заряженные частицы — электроны, которые передают энергию по тоководам: проводам ЛЭП. Для прекращения протекания электрического тока создают разрыв в схеме электрической цепи. Но при этом продолжают действовать мощные инерциальные силы, энергии которых необходимо противостоять.

Дело в том, что мгновенно отключить электрическую цепь и отвести ее контакты на безопасное расстояние невозможно даже при мощном взрыве. В момент размыкания цепи поток электронов продолжает движение по инерции, как и поезд.

Электрические процессы, происходящие в выключателе

Специальные технические конструкции, называемые выключателями нагрузки, созданы для прекращения действия инерционных сил электрического поля, ограничения и ликвидации протекания тока. Упрощенно стадии работы такого выключателя показаны на рисунке ниже.



Когда выключатель включен (рис 1), то через него протекает ток.

С началом разъединения контактов (рис 2) между ними появляется электрическая дуга. Причины ее образования не только связаны с силами инерции, но и с выделением значительного количества теплоты, возникающей при разрыве цепи из-за резкого увеличения сопротивления участка отключения. Повышенная температура активизирует движение электронов, способствует их пролету через образовавшийся промежуток.

Разогнавшиеся в электрическом поле металла электроны попадают во встречные атомы воздуха, передавая им свою кинетическую энергию. При этом возникает разделение нейтральных атомов воздуха на положительные и отрицательные ионы, которые начинают двигаться под действием приложенного к сети потенциала, образуют ионизационный канал.

Таким способом образуется ствол дуги и переход молекул воздуха в состояние разогретой плазмы, проводящей ток.

С увеличением дистанции у разводимых контактов (рис 3) дуга растягивается, а ее температура, под влиянием отвода тепла в окружающую среду и начала обратных процессов деионизации, снижается.

В конечном положении выключателя (рис 4) электрическая дуга обрывается и ток прекращается.

Приведенные примеры лишь приблизительно объясняют принципы и этапы работы выключателя нагрузки. На самом деле процессы в нем описываются более сложными технологиями.

Для гашения дуги высоковольтного разряда чаще всего используется способ помещения ее в инертную среду, обладающую изоляционными свойствами. Это резко снижает увеличение ионизационного слоя, препятствует интенсивности дугообразования. В качестве изоляционных веществ используют:

- масло;
- сжатый воздух;
- вакуум;
- гексафторид серы (элегаз).

Способы управления выключателями

Рассмотренные выше конструкции силового оборудования коммутируют мощные потоки электроэнергии, но не могут самостоятельно определить момент времени и очередность выполнения операций по переключениям. Этим целям служат специальные устройства автоматики, которые имеют:

- измерительные органы электрических параметров контролируемой сети;
- логические аппараты, обрабатывающие поступающую на них информацию от измерительных органов;
- средства ручного и автоматического управления, работающие с местных пультов или дистанционно.

Измерительные трансформаторы тока с классом точности 0,5 и выше постоянно отслеживают величину и угол вектора тока в каждой фазе схемы.



Контролем напряжения занимаются измерительные ТН с такими же метрологическими характеристиками точности.



ТТ и ТН переводят первичные величины во вторичные вектора с номинальными значениями тока в 1 или 5 ампер и напряжения в 100 вольт для линейных величин (у фазных снижаются в 1,73 раза).

Эти вектора токов и напряжений передаются на измерительные приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры, счетчики, фиксаторы, регистраторы, самописцы и т.п.) и в цепи защит линии и выключателей для контроля состояния параметров проходящей электроэнергии.

Силовой высоковольтный выключатель нагрузки, который подключен к автоматике со схемами управления, защит, блокировок называют автоматическим выключателем.

Им электротехнический персонал может управлять с местных пультов, расположенных около выключателя и дистанционно разными способами.

Местное управление предназначено для настройки рабочих органов, проверок функционирования систем при наладке и периодическом обслуживании ремонтным персоналом на выведенном из работы оборудовании.

Переключения высоковольтного выключателя под напряжением выполняются оперативным персоналом только дистанционными методами.

В качестве защит выключателя и его линии, снимающих напряжение с защищаемой зоны в случаях возникновения на ней аварийных процессов, могут выступать:

- дифференциально-фазная защита, обладающая высоким быстродействием и реагирующая на все типы повреждений без выдержек времени;
- токовая отсечка, реагирующая на междуфазные замыкания без выдержек времени;
- дистанционная многоступенчатая защита, реагирующая на междуфазные замыкания;
- направленная многоступенчатая токовая защита нулевой последовательности, реагирующая на двухфазные и однофазные замыкания на землю;
- суммарная защита от неполнофазного режима;
- индивидуальная защита от непереключения фаз ;
- высокочастотное телеускорение;
- автоматическое ускорение защит при подаче напряжения на линию;
- оперативное ускорение резервных защит и многие другие устройства.

К средствам автоматики, воздействующим на высоковольтный выключатель, могут относиться:

- устройства ОАПВ— однофазного автоматического повторного включения, которые самостоятельно определяют поврежденную фазу и отключают ее на время уставки с последующим повторным включением, контролируя восстановление параметров линии. В случае неуспешного включения поврежденной фазы передается команда на работу трехфазного АПВ;
- устройства ТАПВ, запускаемые в работу при трехфазном отключении.

Состояние высоковольтного выключателя постоянно контролируется схемой сигнализации, которая подключается к дополнительным блок-контактам КСА, повторяющим через рычажную систему действия силовых контактов. От них загораются сигнальные лампы и световые табло для предоставления информации оперативным работникам.

Скорость отключения

Продолжительность времени работы выключателя зависит от конструкции его привода и типа применяемой энергии для отключения.

Выключатели могут использовать энергию:

- взведенной пружины;
- давления сжатого газа либо воздуха;
- электромагнитного поля;
- или их комбинации.

Современные выключатели полностью выполняют отключение (снимают напряжение со схемы) за время около 0,04 сек с момента получения команды на привод.

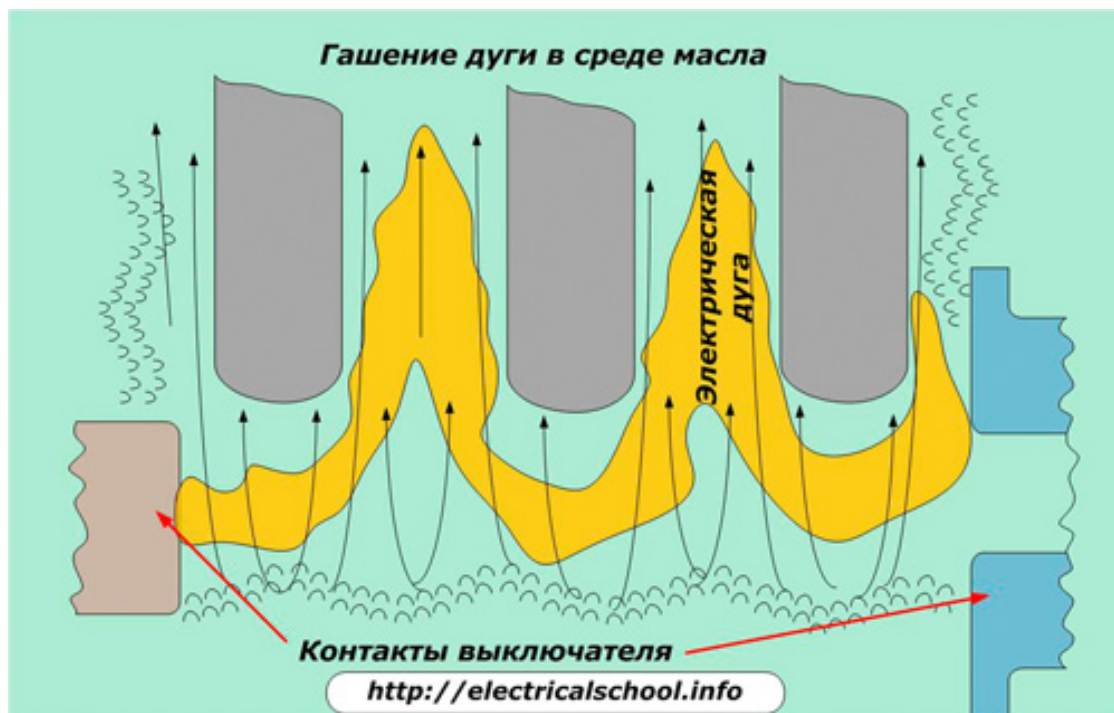
Масляные выключатели

Такие конструкции встречаются в высоковольтном оборудовании до 220 кВ включительно, хотя есть модели, рассчитанные на более высокое напряжение.

У них силовые контакты работают в специальной среде из масла с диэлектрическими свойствами. При размыкании цепи возникающая дуга создает интенсивное испарение масла, образование газового пузыря (освобожденный водород и масляные пары) вокруг разряда.

В рабочей области начинается процесс быстрого проникновения и перемешивания холодных и горячих газов в ствол электрической дуги, провоцирующих процесс деионизации образующегося промежутка.

Бурное газовыделение приводит к возрастанию давления внутри рабочей области бака с контактами, которое тоже противодействует развитию дуги, снижает ее интенсивность.



Для повышения эффективности ликвидации дуги применяют дугогасительные камеры, работающие по принципам:

- автодутья;
- принудительного повышения давления;
- воздействия силового магнитного поля.

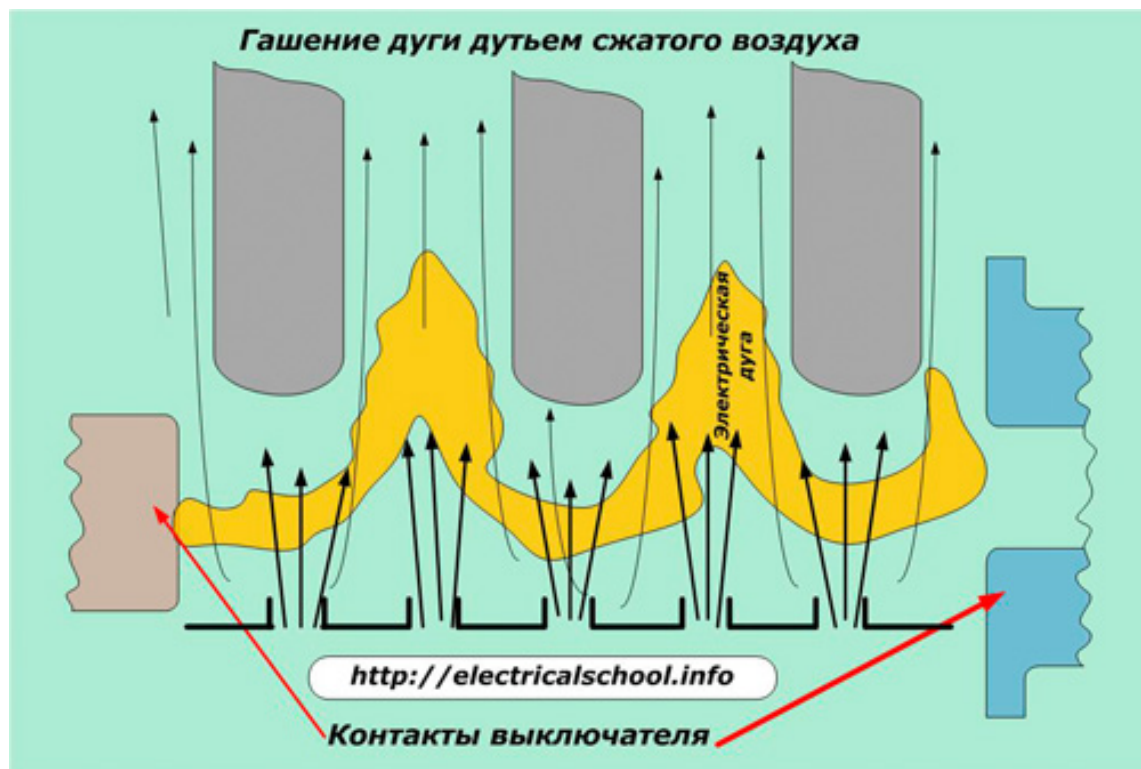
Воздушные выключатели



Они работают в цепях высоковольтного оборудования 110 кВ и выше, относятся к экологическим устройствам.

Сжатый воздух, производимый компрессорными станциями на месте установки выключателей, подается по трубопроводам в их воздушные емкости, давление внутри которых постоянно контролируется.

Возникающая при отключениях дуга ликвидируется действием высокого давления в рабочей полости и сбиванием за счет обдува. Сжатый воздух в этих типах выключателей дополнительно используется для управления исполнительными элементами привода.



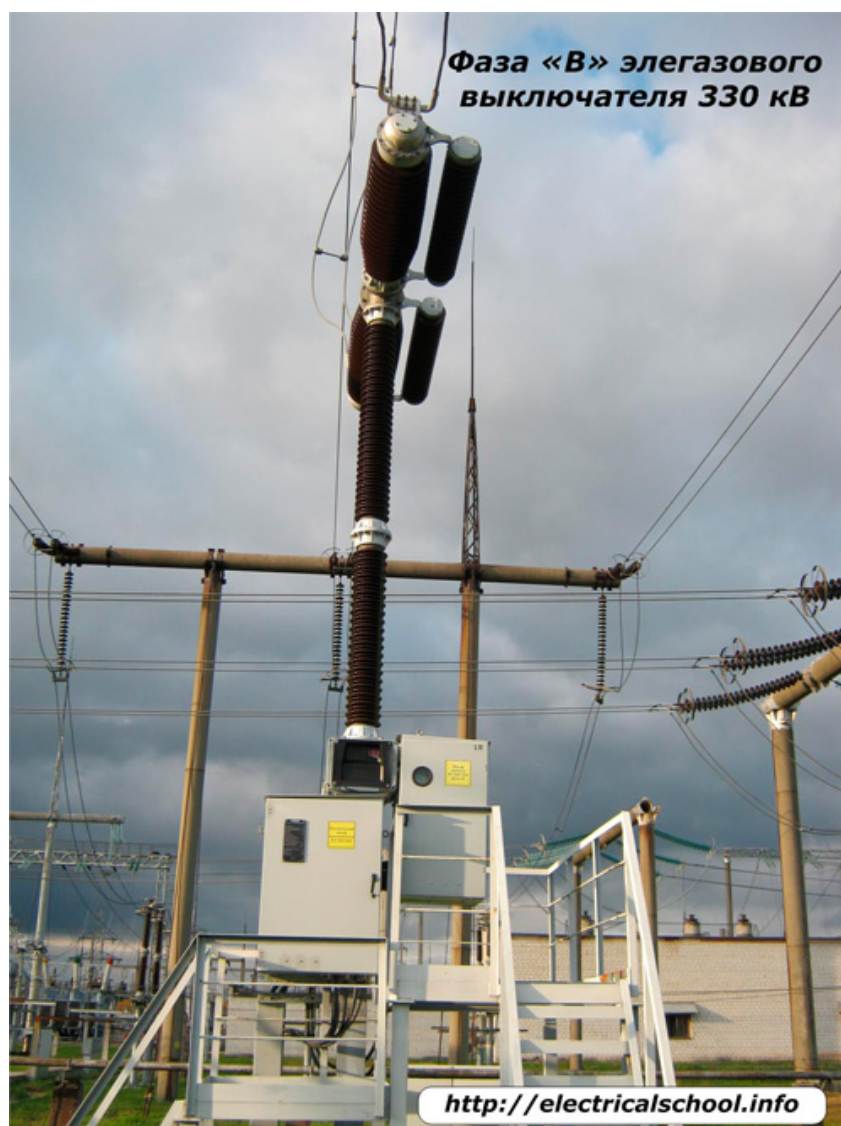
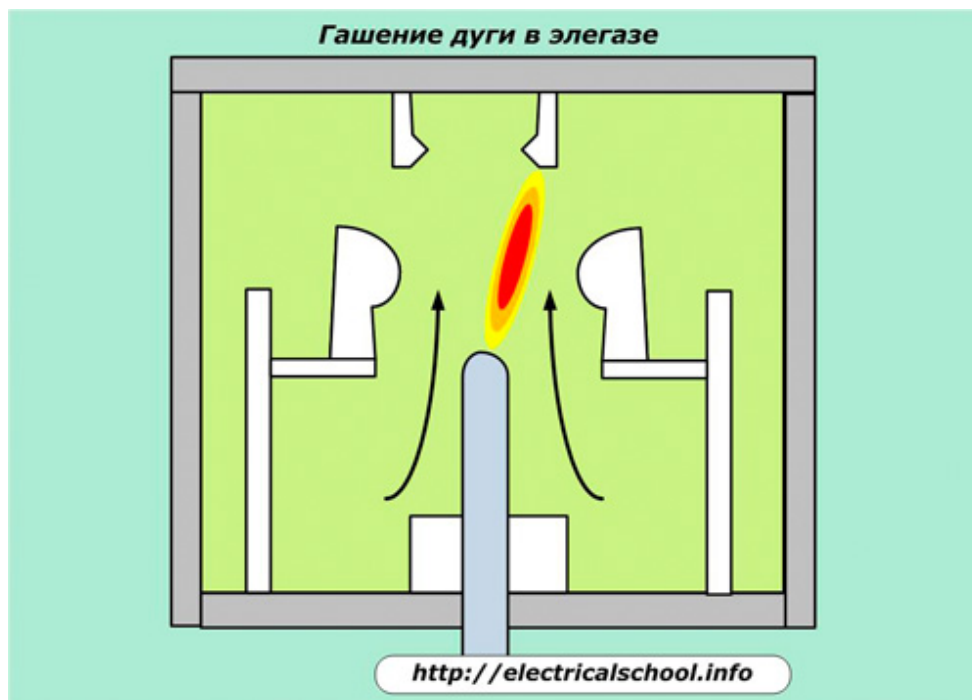
Конструкции воздушных выключателей создают с разными:

- способами образования межконтактного изоляционного интервала в отключенном положении;
- устройствами вдува воздуха внутрь дугогасящих каналов;
- количествами шунтирующих элементов.

Элегазовые выключатели

Эти устройства работают по принципам воздушных выключателей, но с заменой сжатого воздуха на лучший по изоляционным свойствам и электрической прочности элегаз. Их широко внедряют практически для всего класса напряжений высоковольтного оборудования.

Смотрите также: [Элегаз и его свойства](#)



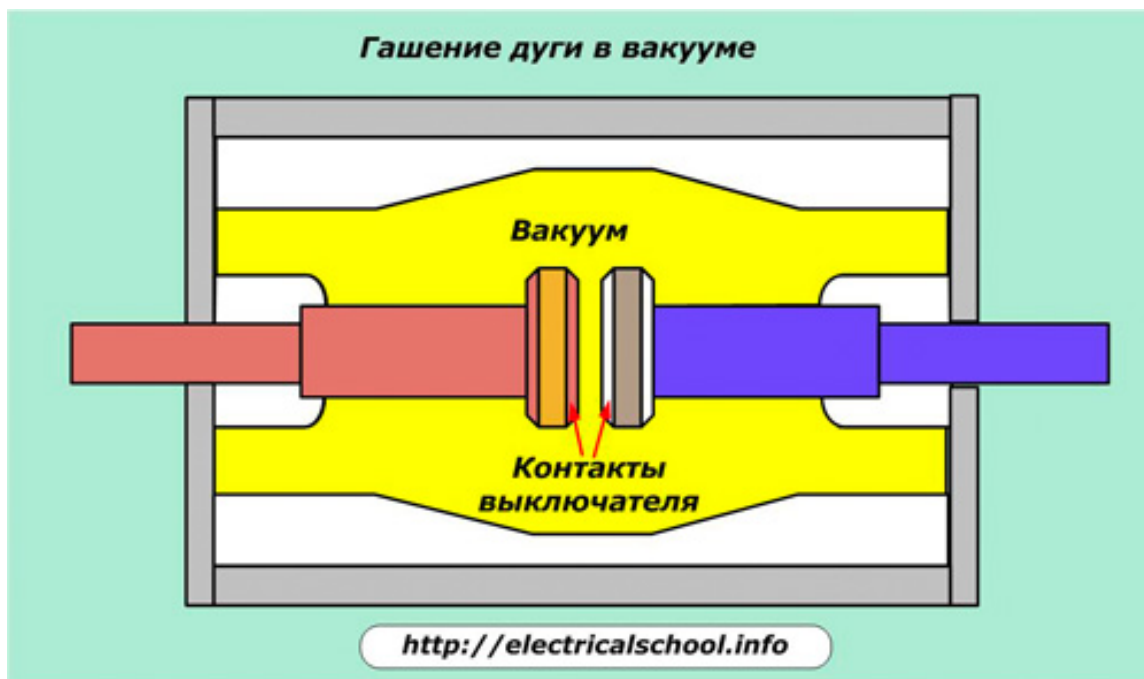
Вакуумные выключатели

Среди современного высоковольтного оборудования, предназначенного для коммутации электрических цепей в энергетике, особое место отводится вакуумным выключателям. Они широко применяются в сетях от 6 до 35 кВ и реже в схемах 110 или 220 кВ включительно.



Их номинальный ток отключения может составлять от 20 до 40 кА, а электродинамической стойкости — порядка 50÷100. Общее время отключения таким выключателем нагрузки или аварии составляет около 45 миллисекунд.

Принцип гашения дуги основан на применении диэлектрических свойств высокоразреженного газа, откачанного из рабочих полостей выключателя специальными конструкциями вакуумных установок. С началом разведения силовых контактов вакуум мгновенно заполняет пространство между ними. Как только первая гармоника синусоиды тока проходит через нулевое положение, так горение дуги прекращается, и выключатель нагрузки полностью останавливает поступление электроэнергии.



Вакуумные конструкции все больше пользуются популярностью благодаря надежности своей работы.



Каждая фаза цепи надежно отделена изоляторами и в то же время все оборудование конструктивно собрано на едином общем приводе. Шины

подстанции подключаются на входные выводы выключателя, а отходящего присоединения — на выходные.

Внутри вакуумной дугогасительной камеры работают силовые контакты, прижимаемые между собой так, чтобы обеспечить минимальное переходное сопротивление и надежное прохождение токов как нагрузки, так и аварии.

Верхняя часть контактной системы стационарно закреплена, а нижняя под действием усилия привода способна перемещаться строго в осевом направлении.



На картинке видно, что контактные пластины расположены в вакуумной камере и приводятся в движение тягами, управляемыми силами натяжения пружин и катушек электромагнитов. Вся эта конструкция расположена внутри системы изоляторов, исключающих возникновение токов утечек.

Стенки вакуумной камеры выполнены из очищенных металлов, сплавов и специальных составов керамики, обеспечивающих герметичность рабочей

среды в течение нескольких десятилетий. Для исключения попадания воздуха при перемещениях подвижного контакта установлено сильфонное устройство.

Якорь электромагнита постоянного тока способен двигаться на замыкание силовых контактов или их разрыв за счет смены полярности подаваемого на обмотку напряжения. Постоянный круговой магнит, встроенный в конструкцию привода, удерживает подвижную часть в любом сработавшем положении.

Система пружин обеспечивает создание оптимальных скоростей передвижения якоря при коммутациях, исключения дребезга контактов и возможностей пробоев конструкции стенок.

Внутри корпуса выключателя собрана кинематическая и электрическая схемы с синхронизирующим валом и дополнительными блок-контактами, обеспечивающими возможности контроля и управления положением выключателя в любом состоянии.

Назначение

По своим функциональным задачам вакуумный выключатель ничем не отличается от других аналогов высоковольтного оборудования. Он обеспечивает:

1. надежное прохождение номинальных электрических мощностей при длительной работе;
2. возможности гарантированных коммутаций оборудования электротехническим персоналом в ручном или автоматическом режиме при оперативных переключениях для изменений конфигурации действующей схемы;
3. автоматическую ликвидацию возникающих аварий за минимально возможное время.

Принципиальное отличие вакуумного выключателя состоит в способе гашения электрической дуги, возникающей при разъединении контактов во время отключения. Если у его аналогов для этого создается среда сжатого воздуха, масла или элегаза, то здесь работает вакуум.

Принцип гашения дуги в силовой схеме

Обе контактные пластины работают в среде вакуума, образованного за счет откачки газов из сосуда дугогасительной камеры до $10^{-6} \div 10^{-8} \text{ Н/см}^2$. При этом создается высокая электрическая прочность, характеризующаяся усиленными диэлектрическими свойствами.

С началом движения приводом контактов на разъединение между ними появляется промежуток, сразу содержащий вакуум. Внутри него начинается процесс испарения нагретого металла контактных площадок. Через эти пары продолжает протекать ток нагрузки. Он инициирует образование

дополнительных электрических разрядов, создающих дугу в среде вакуума, продолжающую развиваться за счет испарения и отрыва паров металла.

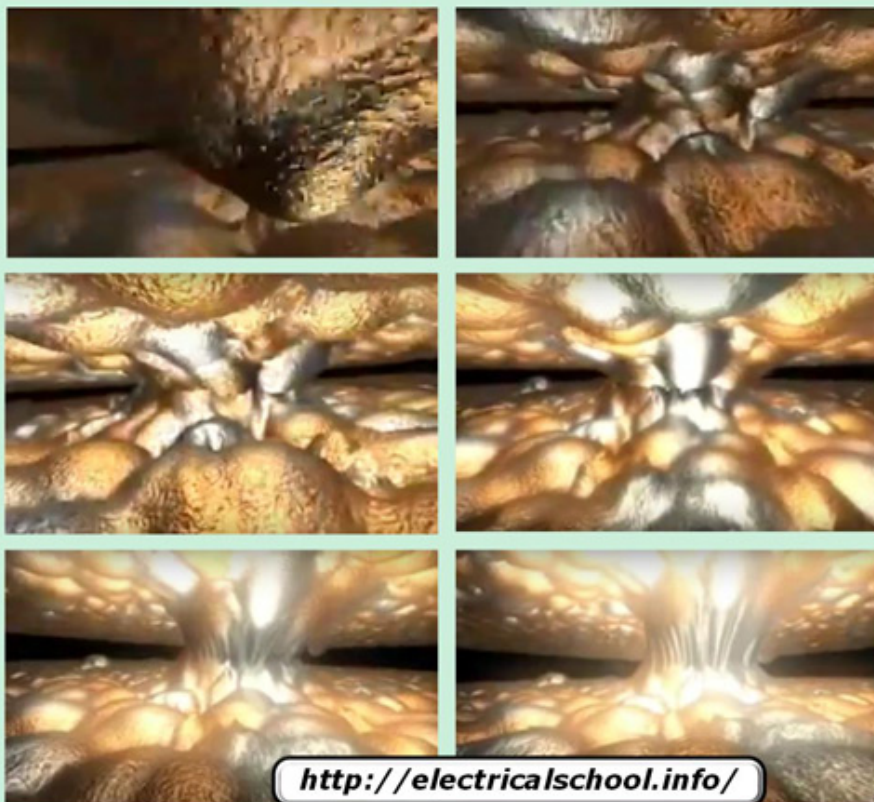
Под действием приложенной разности потенциалов образованные ионы движутся в определенном направлении, создавая плазму.



В ее среде продолжается протекание электрического тока, идет дальнейшая ионизация.

Как гасится дуга в вакуумном выключателе

Развитие ионизации, образование плазмы



Как гасится дуга в вакуумном выключателе

Различные этапы образования плазмы



Поскольку выключатель работает с переменным электрическим током, то его направление в течение каждого полупериода меняется на противоположное. При переходе синусоиды через ноль ток отсутствует. За счет этого дуга резко гаснет и обрывается, а отторгнутые ионы металла прекращают выделяться и за $7 \div 10$ микросекунд полностью оседают на ближайших поверхностях контактов или остальных частях дугогасящей камеры.

В этот момент электрическая прочность промежутка между силовыми контактами, заполненная вакуумом, практически мгновенно восстанавливается, чем обеспечивается окончательное отключение тока нагрузки. В следующем полупериоде синусоиды электрическая дуга возникнуть уже не может.



Таким образом, для прекращения действия электрической дуги в среде вакуума при размыкании силовых контактов достаточно переменному току сменить свое направление.

Технологические особенности различных моделей

Конструкции вакуумных выключателей создаются для длительной работы на открытом воздухе или в закрытых сооружениях. Устройства наружной установки изготавливаются с цельнолитыми полюсами, выполненными с

изоляцией из кремнийорганических материалов, а для внутренней работы применяют литые компаунды эпоксидных составов.

Вакуумные камеры в заводских условиях изготавливают съемными, оптимально настроенными для установки в литом корпусе. Внутри них уже размещены силовые контакты из специальных сортов легированных сплавов. Они, благодаря примененному принципу работы и конструкции, обеспечивают мягкое гашение электрической дуги, исключают возможности образования перенапряжений в схеме.

Универсальный электромагнитный привод используется во всех конструкциях вакуумных выключателей. Он удерживает силовые контакты в замкнутом или отключенном состоянии за счет энергии мощных магнитов.

Коммутация и фиксация контактной системы осуществляется положением «магнитной защелки», переключающей цепь магнитов на воссоединение или отключение подвижного якоря. Встроенные пружинные элементы позволяют осуществлять ручные переключения электротехническому персоналу.

Для управления работой вакуумным выключателем используются типовые релейные схемы или электронные, микропроцессорные блоки, которые могут быть расположены непосредственно в корпусе привода или выполнены выносными устройствами в отдельных шкафах, блоках или на панелях.



Преимущества и недостатки вакуумных выключателей

К достоинствам относят:

- относительную простоту конструкции;
- пониженное потребление электроэнергии для производства переключений;
- удобство ремонта, заключающееся в возможности блочной замены, вышедшей из строя, дугогасительной камеры;
- способность выключателя работать при любой ориентации в пространстве;
- высокую надежность;
- повышенную стойкость к коммутационным нагрузкам;
- ограниченные габариты;
- стойкость к возникновению пожара и взрывов;
- тихую работу при переключениях;
- высокую экологичность, исключающую загрязнение атмосферы.

Недостатками конструкций являются:

- относительно низкие допустимые токи номинальных и аварийных режимов;
- появление коммутационных перенапряжений во время отключений низких индуктивных токов;
- пониженный ресурс дугогасящего устройства по отношению к ликвидации токов коротких замыканий.

6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Часть 1. ТТ

Энергетическое оборудование электрических подстанций организационно разделяется на два вида устройств:

1. силовые цепи, по которым передается вся мощность транспортируемой энергии;
2. вторичные устройства, позволяющие контролировать происходящие процессы в первичной схеме и управлять ими.

Силовое оборудование располагают на открытых площадках или закрытых распределительных устройствах, а вторичное — на релейных панелях, внутри специальных шкафов или отдельных ячеек.

Промежуточным звеном, выполняющим функцию передачи информации между силовой частью и органами измерения, контроля, защит и управления

являются измерительные трансформаторы. Они, как и все подобные устройства, имеют две стороны с разным значением напряжения:

1. высоковольтную, которая соответствует параметрам первичной схемы;
2. низковольтную, позволяющую снизить опасность воздействия силового оборудования на обслуживающий персонал и материальные затраты на создание устройств управления и контроля.

Прилагательное «измерительные» отображает назначение этих электротехнических устройств, поскольку они очень точно моделируют все процессы, происходящие на силовом оборудовании, и разделяются на трансформаторы:

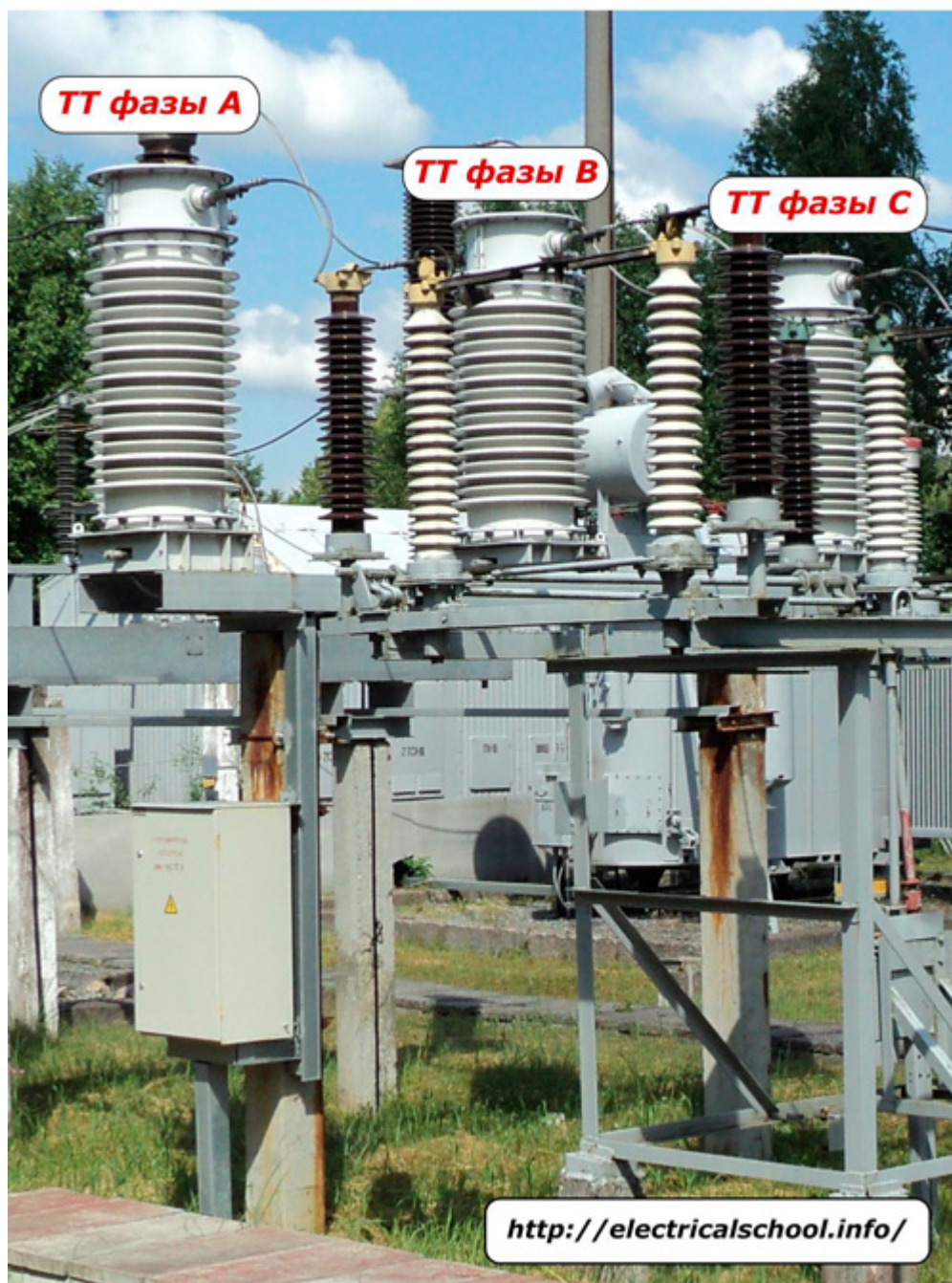
1. тока (ТТ);
2. напряжения (ТН).

Они работают по общим физическим принципам трансформации, но обладают различным конструктивным исполнением и способами включения в первичную схему.

Выполняемые задачи

На фото ниже показано размещение трансформаторов тока для каждой фазы линии и монтаж вторичных цепей в клеммном ящике на ОРУ-110 кВ для силового автотрансформатора.

**Выносные трансформаторы тока силового
автотрансформатора стороны 110 кВ на ОРУ**



Эти же задачи выполняют ТТ на ОРУ-330 кВ, но, учитывая сложность более высоковольтного оборудования, они имеют значительно бóльшие габариты.

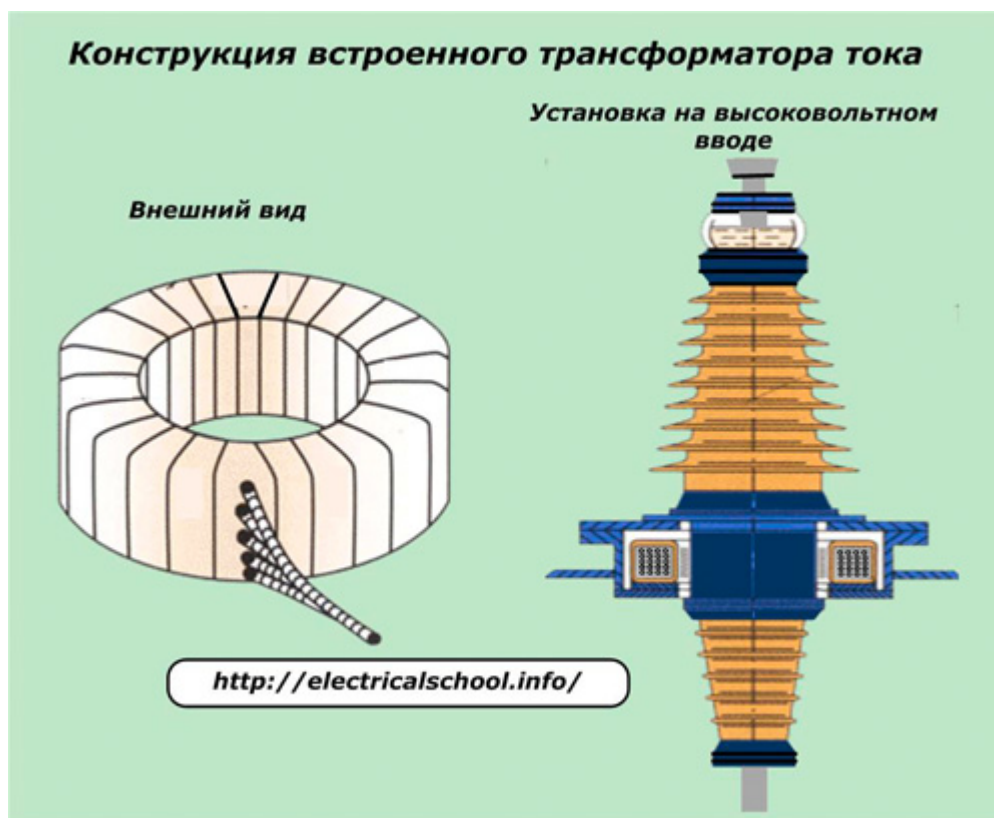
Трансформаторы тока ВЛ-330 кВ на ОРУ-330



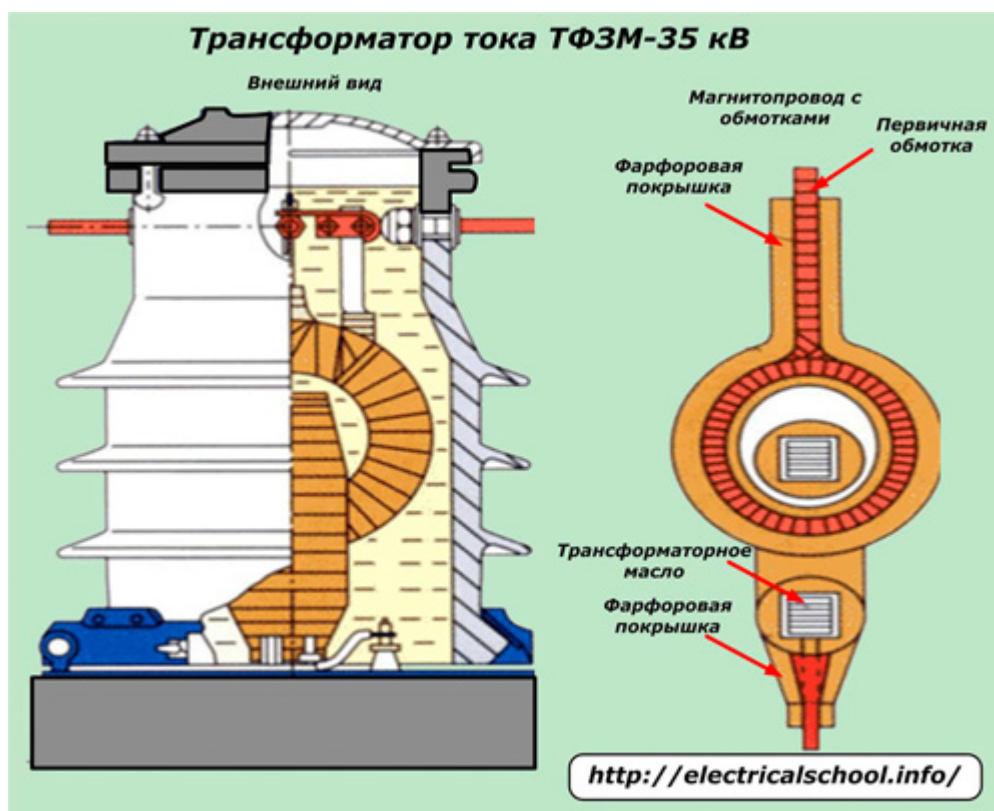
На энергетическом оборудовании часто применяют встроенные конструкции ТТ, которые размещают прямо на корпусе силового объекта.



Они имеют вторичные обмотки с выводами, размещаемыми вокруг высоковольтного ввода в герметичном корпусе. Кабели от зажимов ТТ проложены к прикрепленным здесь же клеммным ящикам.

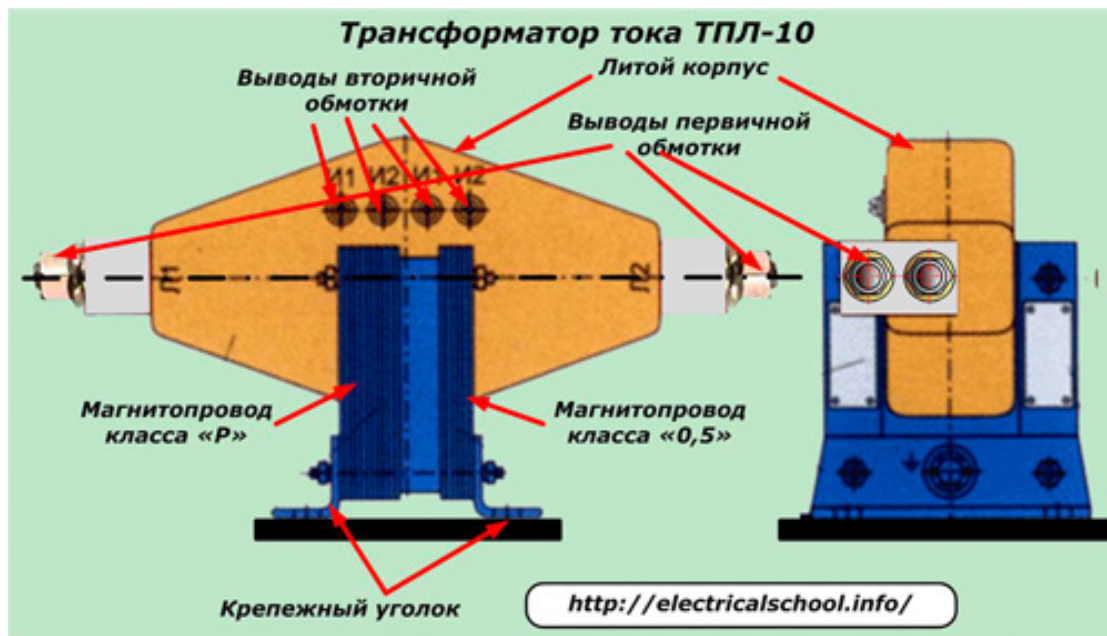


Внутри высоковольтных трансформаторов тока чаще всего в качестве изолятора используется специальное трансформаторное масло. Пример такой конструкции показан на картинке для ТТ серии ТФЗМ, рассчитанной на работу при 35 кВ.

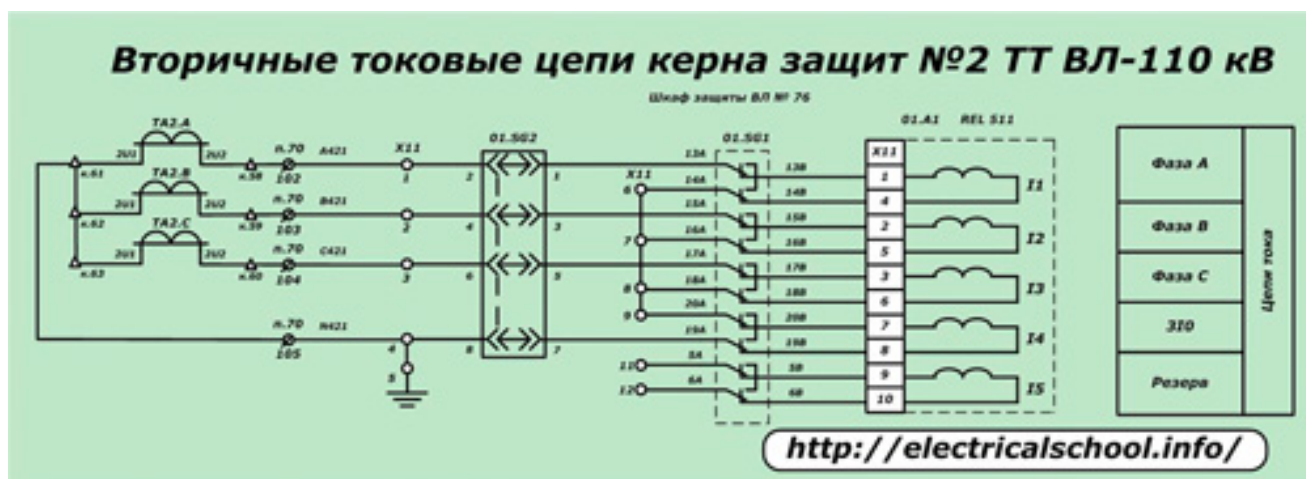


До 10 кВ включительно используются твердые диэлектрические материалы для изоляции между обмотками при изготовлении корпуса.

Примером может служить трансформатор тока марки ТПЛ-10, используемый в КРУН, ЗРУ и других видах распределительных устройств.



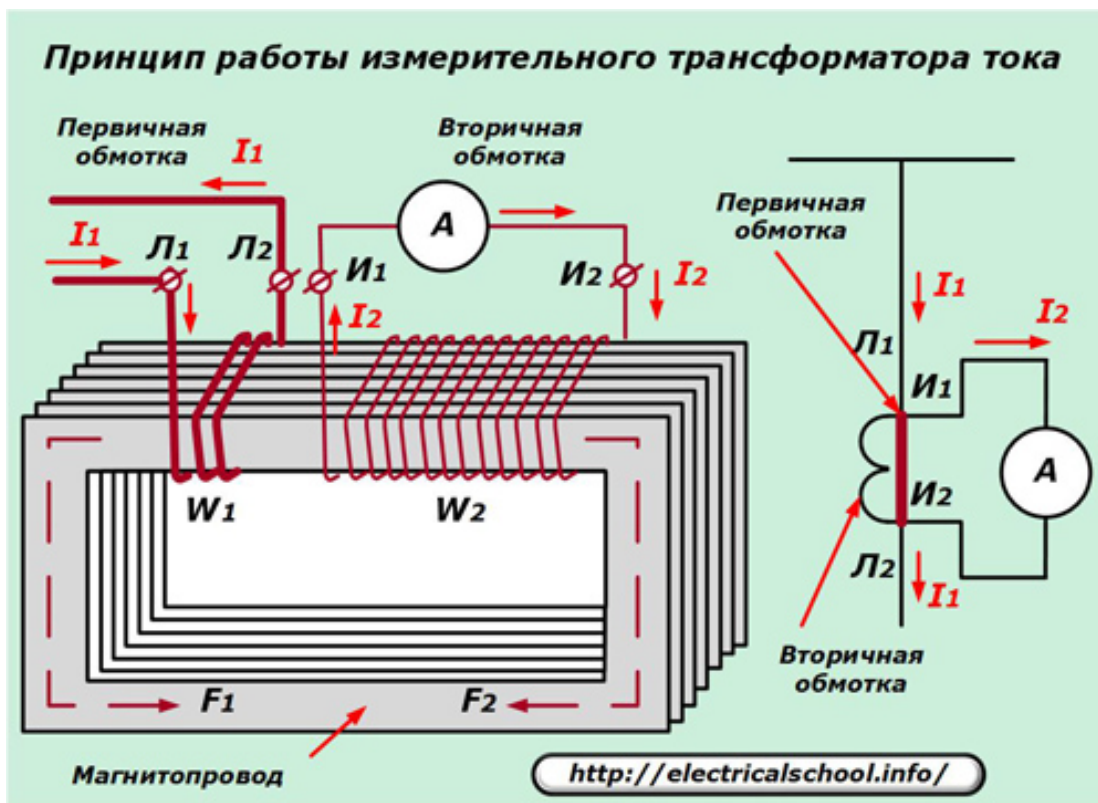
Пример подключения вторичной токовой цепи одного из кернов защит REL 511 для выключателя линии 110 кВ демонстрирует упрощенная схема.



Как сделаны и работают трансформаторы тока

Принципы работы и устройства

В конструкцию измерительного ТТ заложено преобразование векторных величин токов больших значений, протекающих по первичной схеме, в пропорционально уменьшенные по величине и точно так же направленные вектора во вторичных цепях.



Устройство магнитопровода

Конструктивно ТТ, как и любой другой трансформатор, состоит из двух изолированных обмоток, расположенных вокруг общего магнитопровода. Он изготавливается шихтованными металлическими пластинами, для плавки которых используются специальные сорта электротехнических сталей. Это делается для того, чтобы снизить магнитное сопротивление на пути прохождения магнитных потоков, циркулирующих по замкнутому контуру вокруг обмоток и уменьшить потери на вихревые токи.

Трансформатор тока для схем релейных защит и автоматики может иметь не один магнитопровод, а два, отличающиеся количеством пластин и общим объемом используемого железа. Это делается для создания двух типов обмоток, которые могут надежно работать при:

1. номинальных условиях эксплуатации;
2. или при значительных перегрузках, вызванных токами коротких замыканий.

Первые конструкции используются для выполнения измерений, а вторые применяются для подключения защит, отключающих возникающие ненормальные режимы.

Устройство обмоток и клемм подключения

Обмотки ТТ, рассчитанные и изготовленные на постоянную работу в схеме электроустановки, отвечают требованиям безопасного прохождения тока и его

теплового воздействия. Поэтому они выполняются из меди, стали или алюминия с площадью поперечного сечения, исключающей повышенный нагрев.

Поскольку первичный ток всегда больше вторичного, то обмотка для него значительно выделяется своими габаритами, как показано на картинке ниже для правого трансформатора.



На левой и средней конструкции силовой обмотки вообще нет. Вместо нее предусмотрено отверстие в корпусе, через которое пропускается питающий силовой электрический провод или стационарная шина. Такие модели используются, как правило, в электроустановках до 1000 вольт.

На выводах обмоток ТТ всегда предусмотрено стационарное крепление для подключения шин и соединительных проводов с помощью болтов и винтовых зажимов. Это одно из ответственных мест, где может быть нарушен электрический контакт, который способен привести к поломкам или нарушениям точной работы измерительной системы. Качеству его затяжки в первичной и вторичной схеме всегда обращается внимание при эксплуатационных проверках.

Клеммы ТТ маркируются на заводе во время изготовления и обозначаются:

- Л1 и Л2 для входа и выхода первичного тока;
- И1 и И2 — вторичного.

Эти индексы означают направление навивки витков относительно друг друга и влияют на правильность подключения силовых и моделируемых цепей, характеристику распределения векторов токов по схеме. На них обращают внимание при первичном монтаже ТТ или заменах неисправных устройств и даже исследуют различными методиками электрических проверок как до сборки устройств, так и после монтажа.

Количество витков в первичной W1 и вторичной W2 схеме не одинаково, а сильно отличается. Высоковольтные трансформаторы тока обычно имеют

всего одну прямую шину, пропущенную сквозь магнитопровод, которая работает в качестве силовой обмотки. Вторичная же катушка имеет большее количество витков, которое влияет на коэффициент трансформации. Его для удобства эксплуатации записывают дробным выражением номинальных величин токов в обеих обмотках.

Например, запись 600/5 на шильдике корпуса означает, что ТТ предназначен для включения в цепь высоковольтного оборудования с номинальным током 600 ампер, а во вторичной схеме будет трансформироваться только 5.

Каждый измерительный трансформатор тока включается в свою фазу первичной сети. Количество же вторичных обмоток для устройств релейной защиты и автоматики обычно увеличивается для раздельного использования в кернах токовых цепей для:

- измерительных приборов;
- общих зашит;
- зашит шин и ошиновок.

Такой способ позволяет исключить влияние менее ответственных цепочек на более значимые, упростить их обслуживание и проверки на действующем оборудовании, находящемся под рабочим напряжением.

С целью маркировки выводов таких вторичных обмоток применяют обозначение 1И1, 1И2, 1И3 для начал и 2И1, 2И2, 2И3 — концов.

Устройство изоляции

Каждая модель ТТ рассчитана для работы с определенной величиной высоковольтного напряжения на первичной обмотке. Слой изоляции, расположенный между обмотками и корпусом, должен длительно выдерживать потенциал силовой сети своего класса.

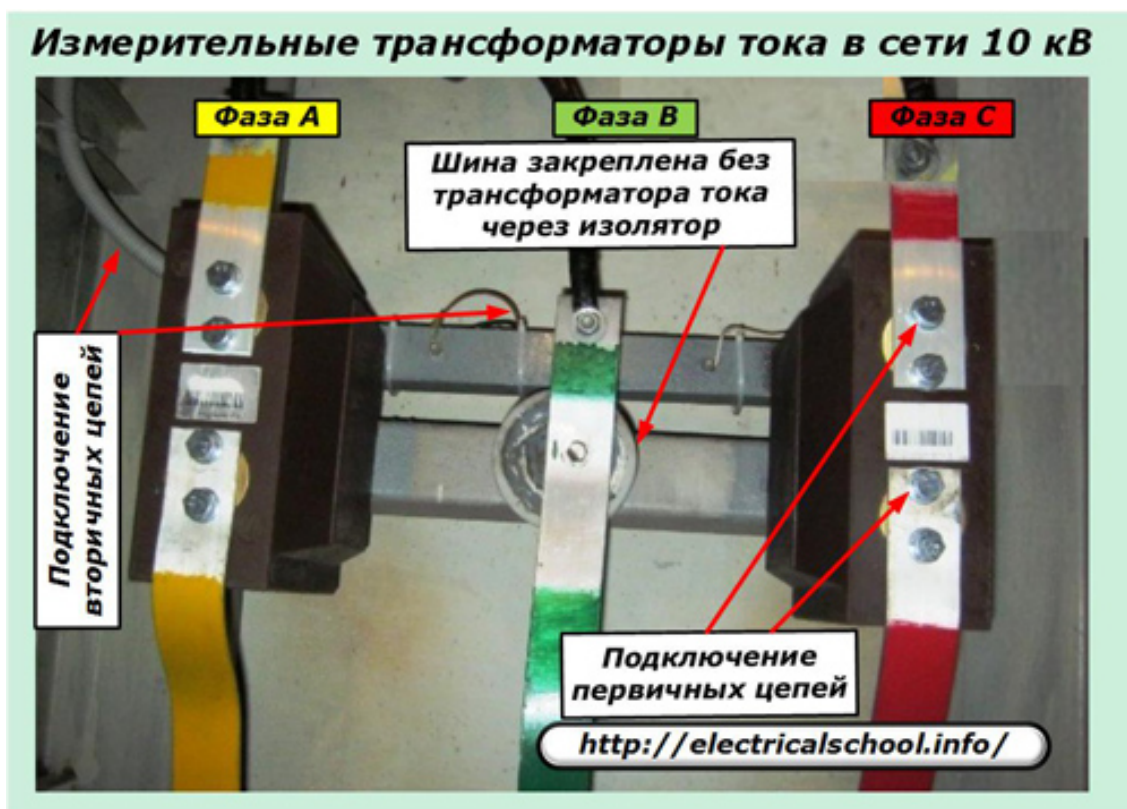
С внешней стороны изоляции высоковольтных ТТ в зависимости от назначения может применяться:

- фарфоровое покрытие;
- загустевшие эпоксидные смолы;
- некоторые виды пластмасс.

Эти же материалы могут быть дополнены трансформаторной бумагой или маслом для изоляции внутренних пересечений проводов на обмотках и исключения межвитковых замыканий.

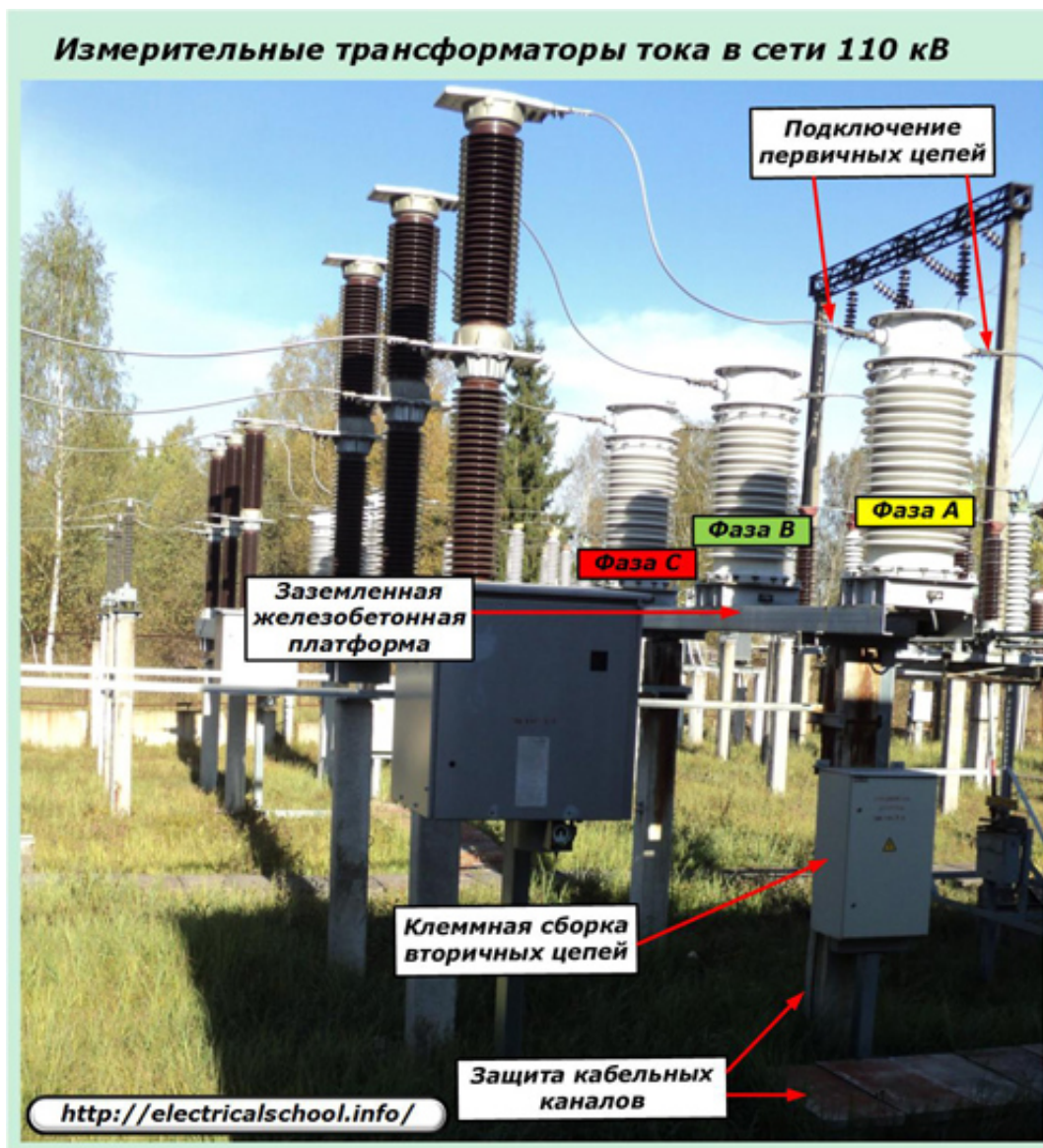
Класс точности ТТ

Идеально трансформатор теоретически должен работать точно, без внесения погрешностей. Однако, в реальных конструкциях происходят потери



Здесь видно, что шины присоединения первичных фаз А и С подключены болтовым соединением к выводам ТТ, а вторичные цепи спрятаны за ограждение и выведены отдельным жгутом проводов в защитной трубе, которая направляется в релейный отсек для подключения цепей на клеммники.

Этот же принцип монтажа применяется и в других схемах высоковольтного оборудования, как показано на фотографии для сети 110 кВ.



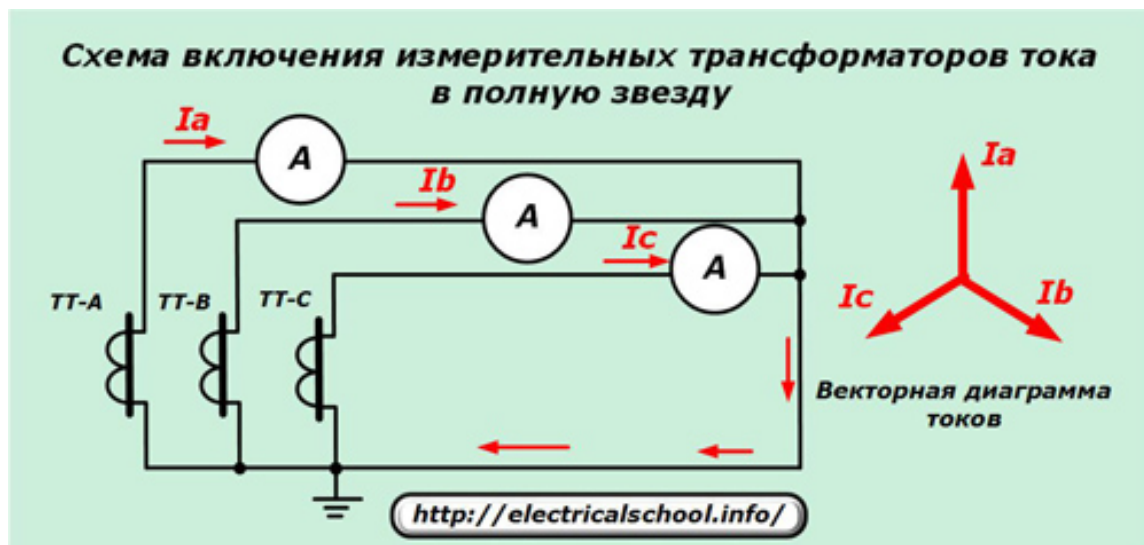
Здесь корпуса измерительных трансформаторов смонтированы на высоте с помощью заземленной железобетонной платформы, что требует правила безопасности. Подключение первичных обмоток к силовым проводам выполнено в рассечку, а все вторичные цепи выведены в рядом расположенный ящик с клеммной сборкой.

Кабельные соединения вторичных токовых цепей защищены от случайного внешнего механического воздействия металлическими чехлами и бетонными плитами.

2. Вторичные обмотки

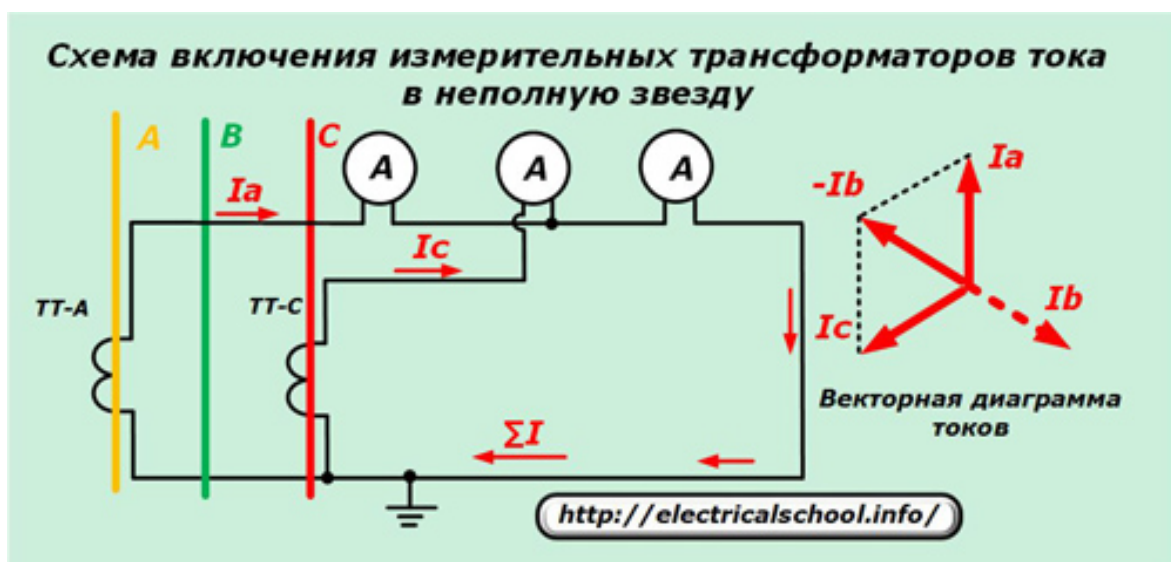
Как уже отмечено выше, выходные керны ТТ собираются для работы с измерительными приборами или защитными устройствами. Это влияет на сборку схемы.

Если необходимо контролировать по амперметрам ток нагрузки в каждой фазе, то используется классический вариант подключения — схема полной звезды.



В этом случае каждый прибор показывает величину тока своей фазы с учетом угла между ними. Использование автоматических самописцев в этом режиме наиболее удобно позволяет отображать вид синусоид и строить по ним векторные диаграммы распределения нагрузок.

Часто на отходящих фидерах 6÷10 кВ в целях экономии устанавливают не три, а два измерительных трансформатора тока без задействования одной фазы В. Этот случай показан на расположенном выше фото. Он позволяет включить амперметры по схеме неполной звезды.



За счет перераспределения токов на дополнительном приборе получается отобразить векторную сумму фаз А и С, которая противоположно направлена вектору фазы В при симметричном режиме нагрузки сети.

Случай включения двух измерительных ТТ для контроля линейного тока с помощью реле показан на картинке ниже.

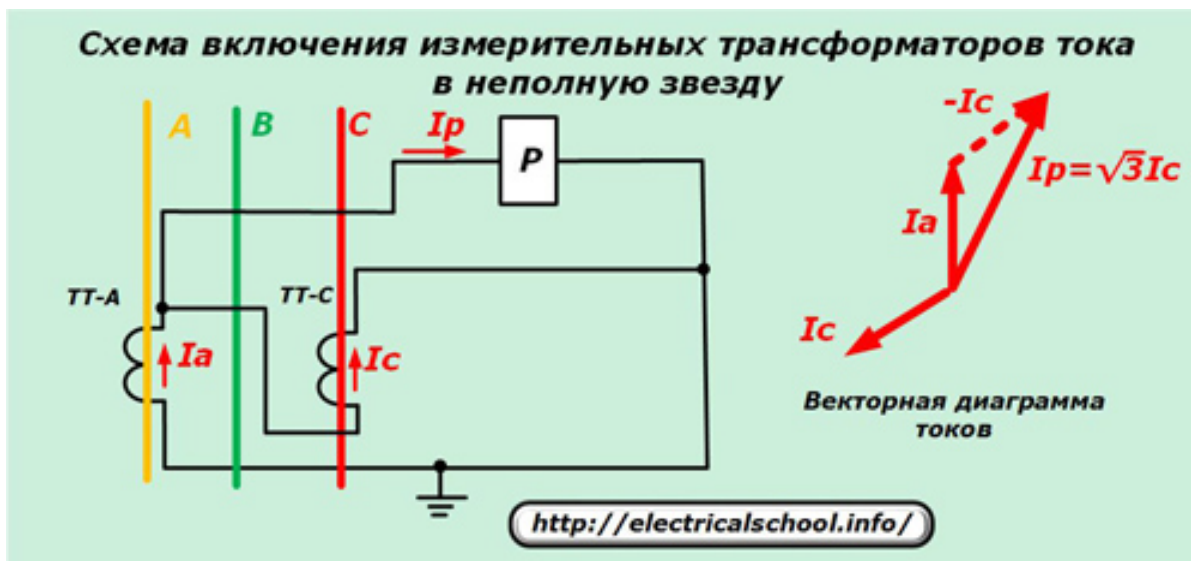
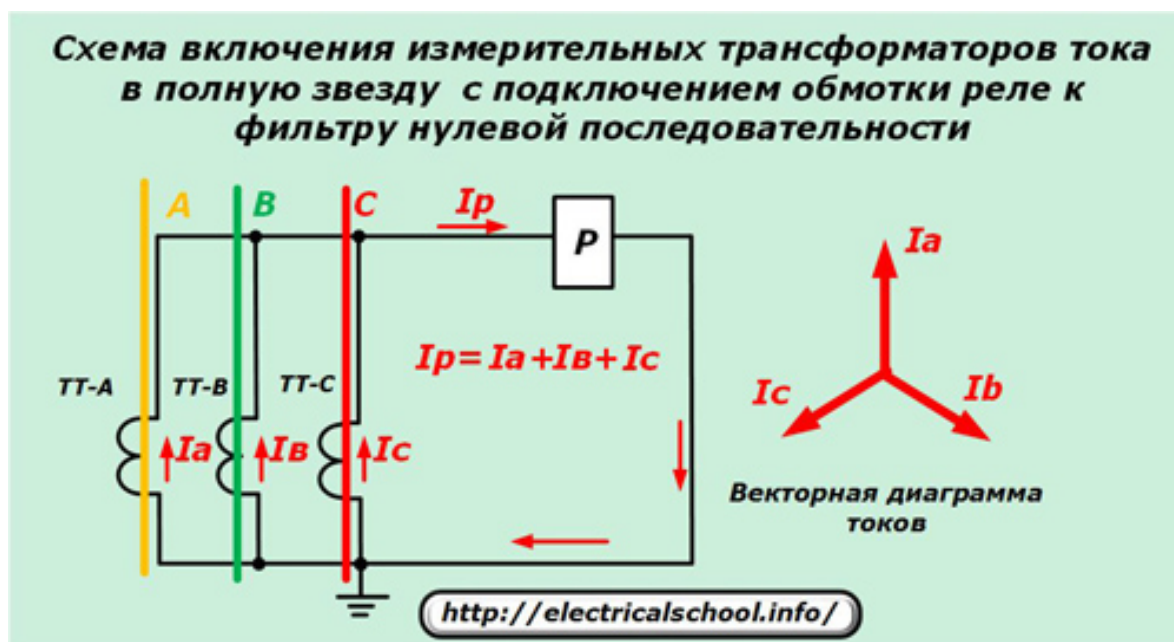


Схема полностью позволяет контролировать симметричную нагрузку и трехфазные короткие замыкания. При возникновении двухфазных КЗ, особенно АВ или ВС, чувствительность такого фильтра сильно занижена.

Распространенная схема контроля токов нулевой последовательности создается подключением измерительных ТТ в схему полной звезды, а обмотки контрольного реле к объединенному проводу нуля.



Ток, проходящий через обмотку создан сложением всех трех векторов фаз. При симметричном режиме он сбалансирован, а во время возникновения однофазных или двухфазных КЗ происходит выделение в реле составляющей дисбаланс величины.

Особенности эксплуатации измерительных трансформаторов тока и их вторичных цепей

Оперативные переключения

При работе ТТ создается баланс магнитных потоков, образованных токами в первичной и вторичной обмотке. В результате они уравновешены по величине, направлены встречно и компенсируют влияние созданных ЭДС в замкнутых цепях.

Если первичную обмотку разомкнуть, то по ней ток перестанет протекать и все вторичные схемы будут просто обесточены. А вот вторичную цепь при прохождении тока по первичной размыкать нельзя, иначе под действием магнитного потока во вторичной обмотке вырабатывается электродвижущая сила, которая не тратится на протекание тока в замкнутом контуре с малым сопротивлением, а используется в режиме холостого хода.

Это приводит к появлению на разомкнутых контактах высокого потенциала, который достигает несколько киловольт и способен пробить изоляцию вторичных цепей, нарушить работоспособность оборудования, нанести электрические травмы обслуживающему персоналу.

По этой причине все переключения во вторичных цепях ТТ производят по строго определенной технологии и всегда под надзором контролирующих лиц без разрыва токовых цепей. Для этого используют:

- специальные виды клеммников, позволяющие устанавливать дополнительную закоротку на время разрыва выводимого из работы участка;
- испытательные токовые блоки с закорачивающими перемычками;
- специальные конструкции переключателей.

Регистраторы аварийных процессов

Измерительные приборы делят по виду фиксации параметров при:

- номинальном режиме эксплуатации;
- возникновении сверхтоков в системе.

Чувствительные элементы регистраторов прямо пропорционально воспринимают поступающий на них сигнал и также отображают его. Если величина тока поступила на их вход с искажением, то эта погрешность будет введена в показания.

По этой причине приборы, предназначенные для измерения аварийных токов, а не номинальных, подключают в керны защит ТТ, а не измерений.

Часть 2. ТН

Существует два способа преобразования напряжений величиной в десятки и сотни киловольт для управления работой устройств релейных защит и автоматики на основе двух принципов:

1. трансформации электроэнергии;
2. емкостного разделения.

Первый способ позволяет более точно отображать вектора первичных величин и за счет этого широко распространен. Второй метод используется для контроля определенной фазы напряжения сети 110 кВ схем с обходной системой шин и в некоторых других случаях. Но, за последнее время он находит все большее применение.

Как изготовлены и работают измерительные трансформаторы напряжения

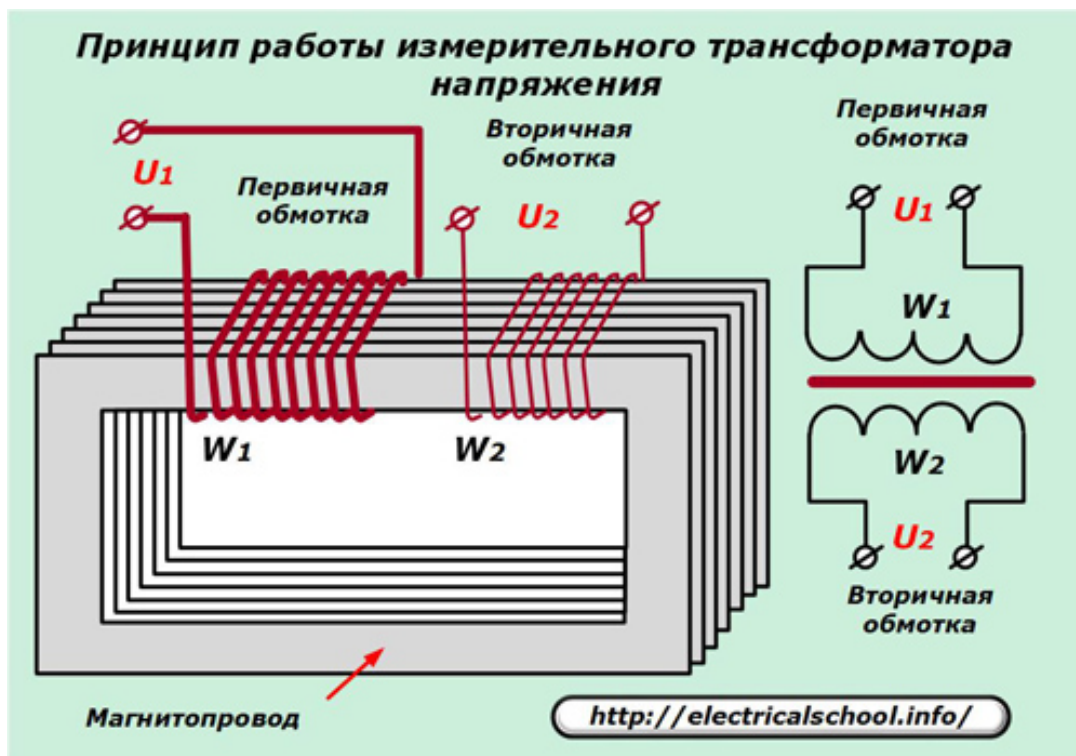
Основное принципиальное отличие измерительных ТН от ТТ состоит в том, что они, как и все силовые модели, рассчитаны на обычную работу без закороченной вторичной обмотки.

В то же время, если силовые трансформаторы предназначены для передачи транспортируемой мощности с минимальными потерями, то измерительные ТН конструируются с целью высокоточного повторения в масштабе векторов первичного напряжения.

Принципы работы и устройства

Конструкцию ТН, как и ТТ, можно представить магнитопроводом с намотанными вокруг него двумя обмотками:

- первичной;
- вторичной.



Специальные сорта стали для магнитопровода, а также металл их обмоток и слой изоляции подбираются для максимально точного преобразования напряжения с наименьшими потерями. Число витков первичной и вторичной катушек рассчитывается таким образом, чтобы номинальное значение высоковольтного линейного напряжения сети, подаваемое на первичную обмотку, всегда воспроизводилось вторичной величиной 100 вольт с тем же направлением вектора для систем, собранных с заземленной нейтралью.

Если же первичная схема передачи энергии создана с изолированной нейтралью, то на выходе измерительной обмотки будет присутствовать $100/\sqrt{3}$ вольт.

Для создания разных способов моделирования первичных напряжений на магнитопроводе может располагаться не одна, а несколько вторичных обмоток.

Схемы включения ТН

Измерительные трансформаторы применяются для замера линейных и/или фазных первичных величин. Для этого силовые обмотки включают между:

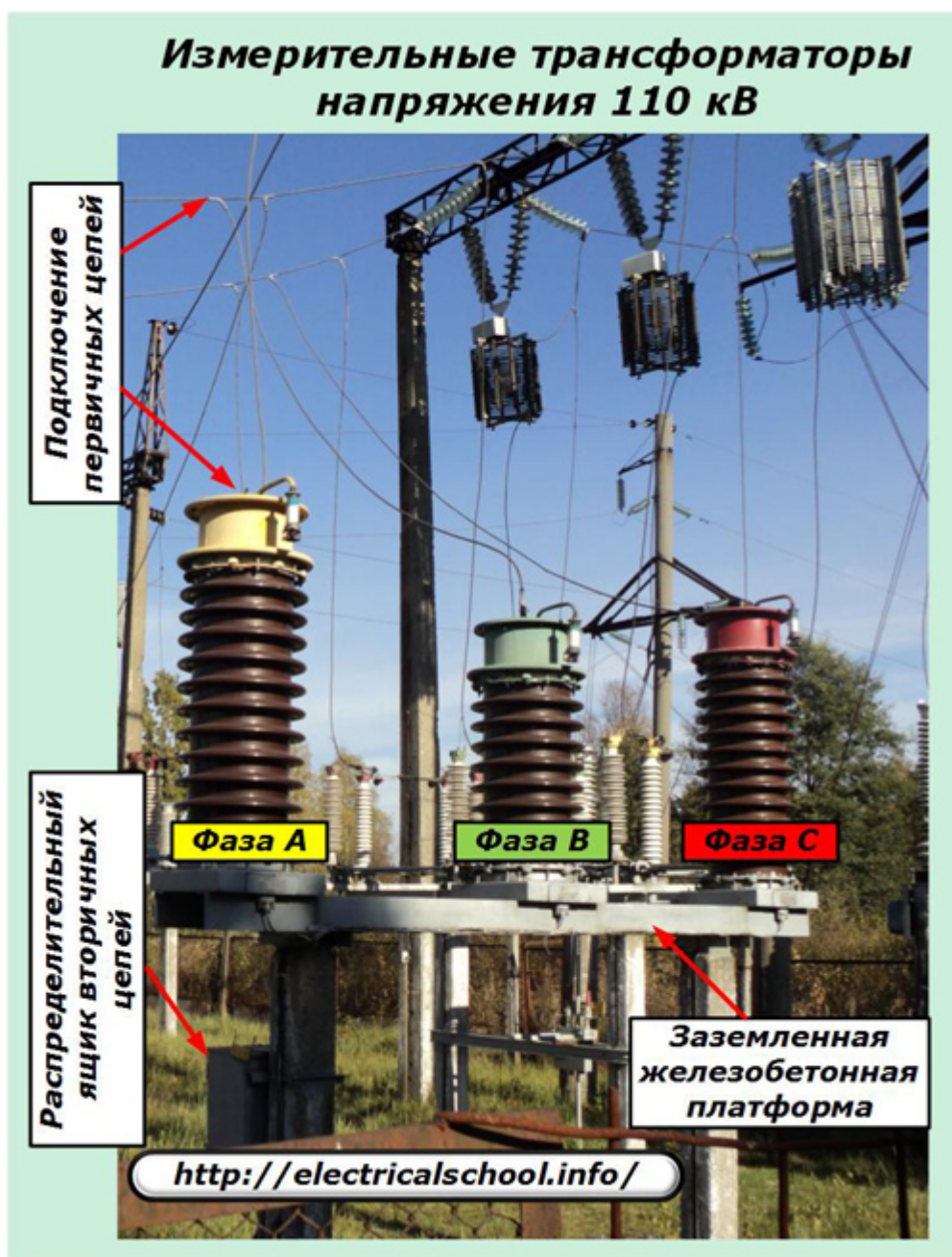
- проводами линии с целью контроля линейных напряжений;
- шиной или проводом и землей, чтобы снимать фазное значение.

Важным элементом безопасности измерительных ТН является заземление их корпуса и вторичной обмотки. На него обращается повышенное внимание, ведь при пробое изоляции первичной обмотки на корпус или во вторичные цепи в них появится высоковольтный потенциал, способный травмировать людей и сжечь оборудование.

Преднамеренное заземление корпуса и одной вторичной обмотки отводит этот опасный потенциал на землю, чем предотвращает дальнейшее развитие аварии.

1. Силовое оборудование

Пример подключения измерительного ТН в сети 110 киловольт показан на фотографии.



Здесь выделено, что силовой провод каждой фазы подключен ответвлением к выводу первичной обмотки своего трансформатора, размещенного на общей заземленной железобетонной опоре, поднятой на безопасную для электротехнического персонала высоту.

Корпус каждого измерительного ТН со вторым выводом первичной обмотки заземляется прямо на этой платформе.

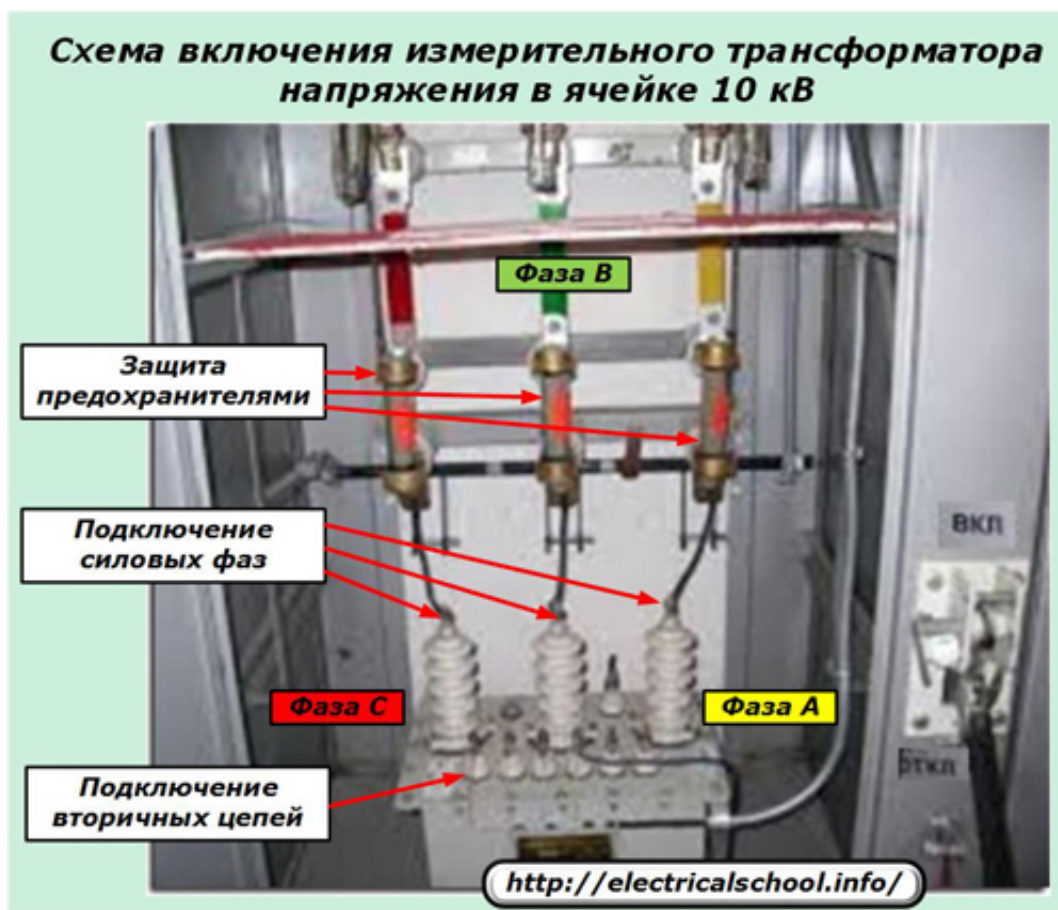
Вывода вторичных обмоток собраны в клеммной коробке, расположенной в нижней части каждого ТН. К ним подключаются провода кабелей, собираемых в распределительном силовом ящике, расположенном рядом на высоте, удобной для обслуживания с земли.

В нем не только осуществляется коммутация схемы, но и устанавливаются автоматические выключатели вторичных цепей напряжения и рубильники или блоки для выполнения оперативных переключений и проведения безопасного обслуживания оборудования.

Собранные здесь шинки напряжения подводятся к устройствам релейных защит и автоматики специальным силовым кабелем, к которому предъявляются повышенные требования по снижению потерь напряжения.

Кабельные трассы измерительных ТН также защищаются металлическими коробами или железобетонными плитами от случайного механического повреждения, как и ТТ.

Еще один вариант подключения измерительного трансформатора напряжения типа НАМИ, размещенного в ячейке сети 10 кВ, показан на картинке ниже.

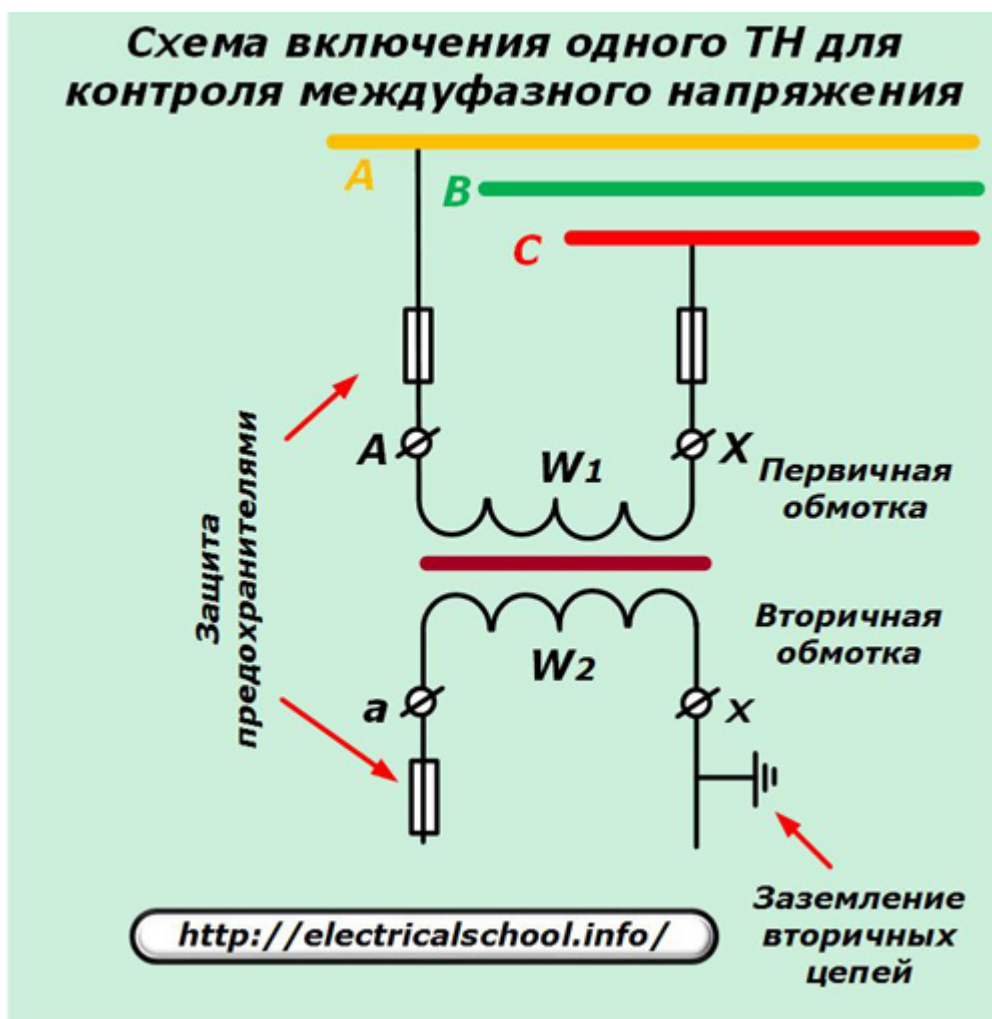


ТН на стороне высоковольтного напряжения защищается стеклянными предохранителями в каждой фазе и может отделяться приводом с ручным управлением от силовой схемы для выполнения эксплуатационных проверок.

Каждая фаза первичной сети подключается на соответствующий ввод силовой обмотки. Провода вторичных цепей выводятся отдельным кабелем к своему клеммнику.

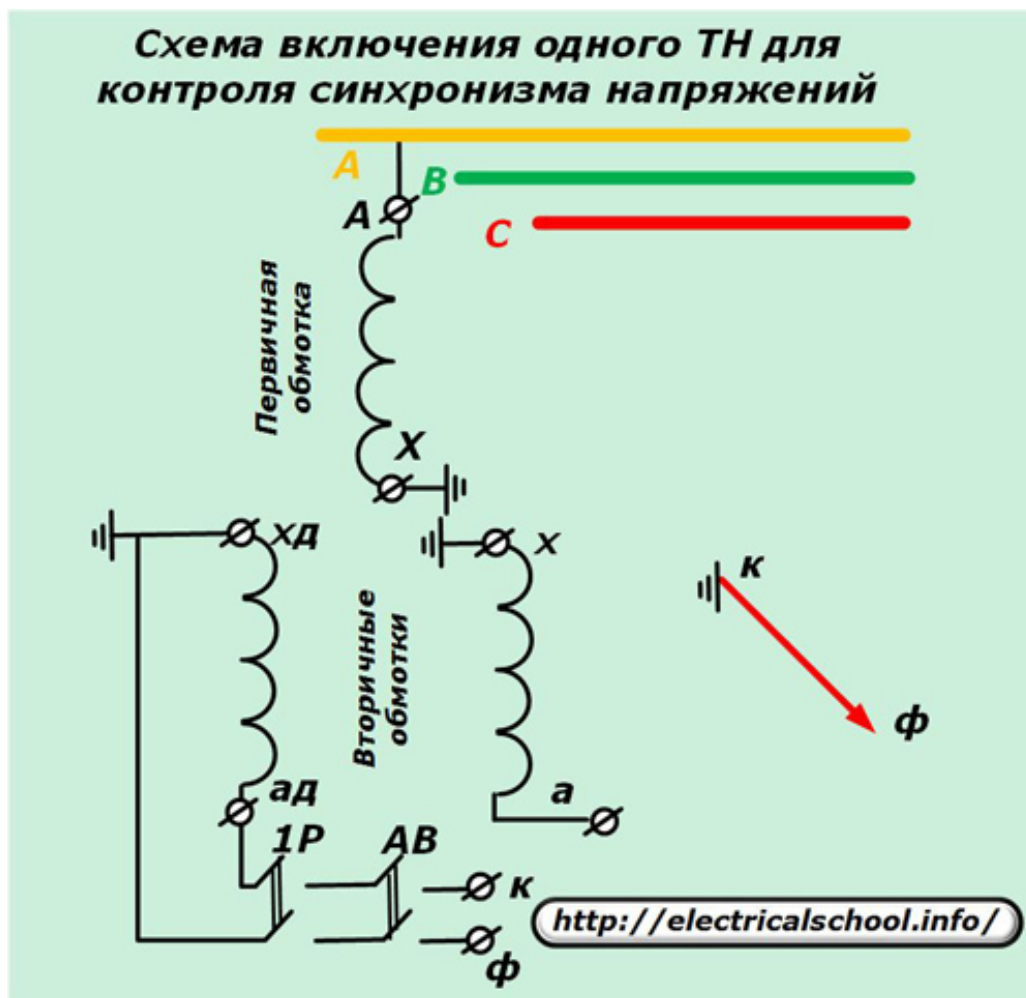
2. Вторичные обмотки и их цепи

Простая схема включения одного трансформатора на линейное напряжение силовой схемы показана ниже.



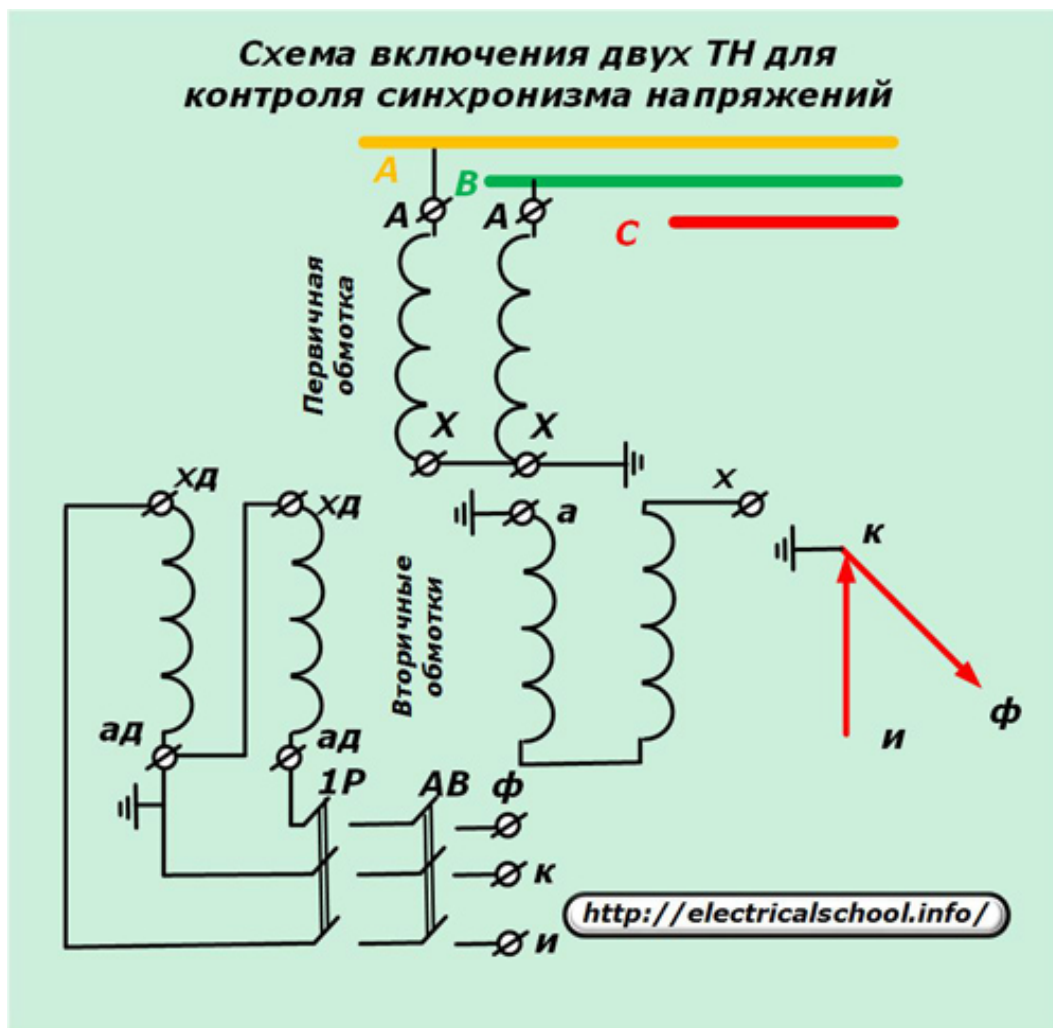
Эта конструкция может встретиться в цепях до 10 кВ включительно. Она на каждой стороне имеет защиту предохранителями соответствующих номиналов.

В сети 110 кВ подобный ТН может устанавливаться на одну фазу обходной системы шин для обеспечения контроля синхронизма цепей подключаемого присоединения и ОСШ.



На вторичной стороне используются две обмотки: основная и дополнительная, обеспечивающие выполнение синхронного режима при управлении выключателями с блочного щита.

Для включения ТН на две фазы обходной системы шин при управлении выключателями с главного щита применяется следующая схема.



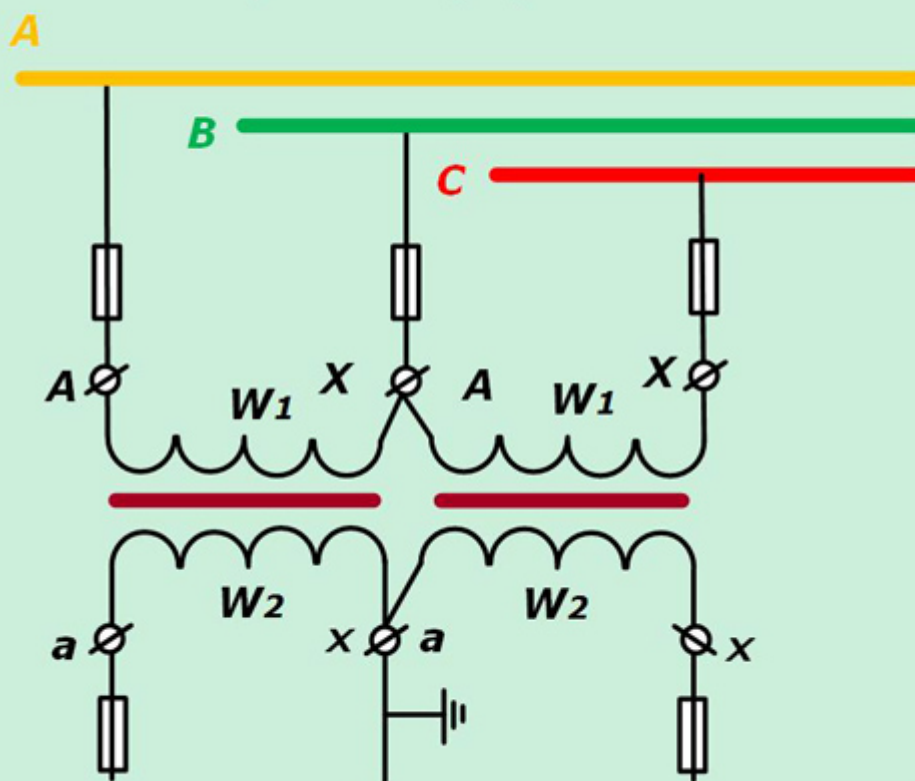
Здесь ко вторичному вектору «кф», образованному предыдущей схемой, добавляется вектор «ик».

Следующая схема получила название «открытого треугольника» или неполной звезды.

Она позволяет смоделировать систему из двух или трех междуфазных напряжений.

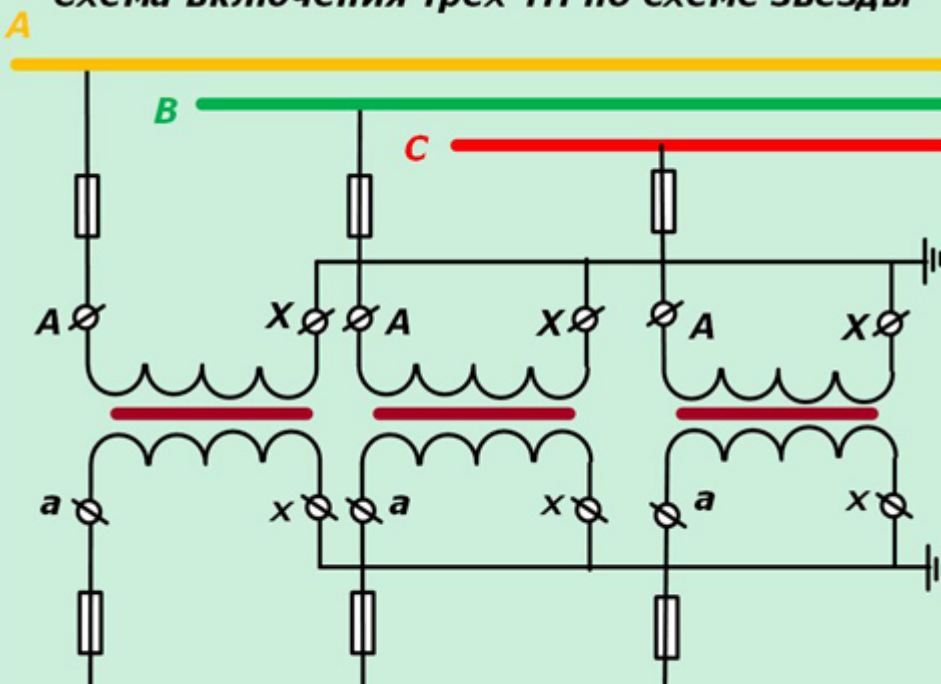
Наибольшими же возможностями обладает подключение трех ТН по схеме полной звезды. В этом случае можно получить как все фазные, так и линейные напряжения во вторичных цепях.

Схема включения двух ТН по схеме открытого треугольника



<http://electricalschool.info/>

Схема включения трех ТН по схеме звезды



<http://electricalschool.info/>

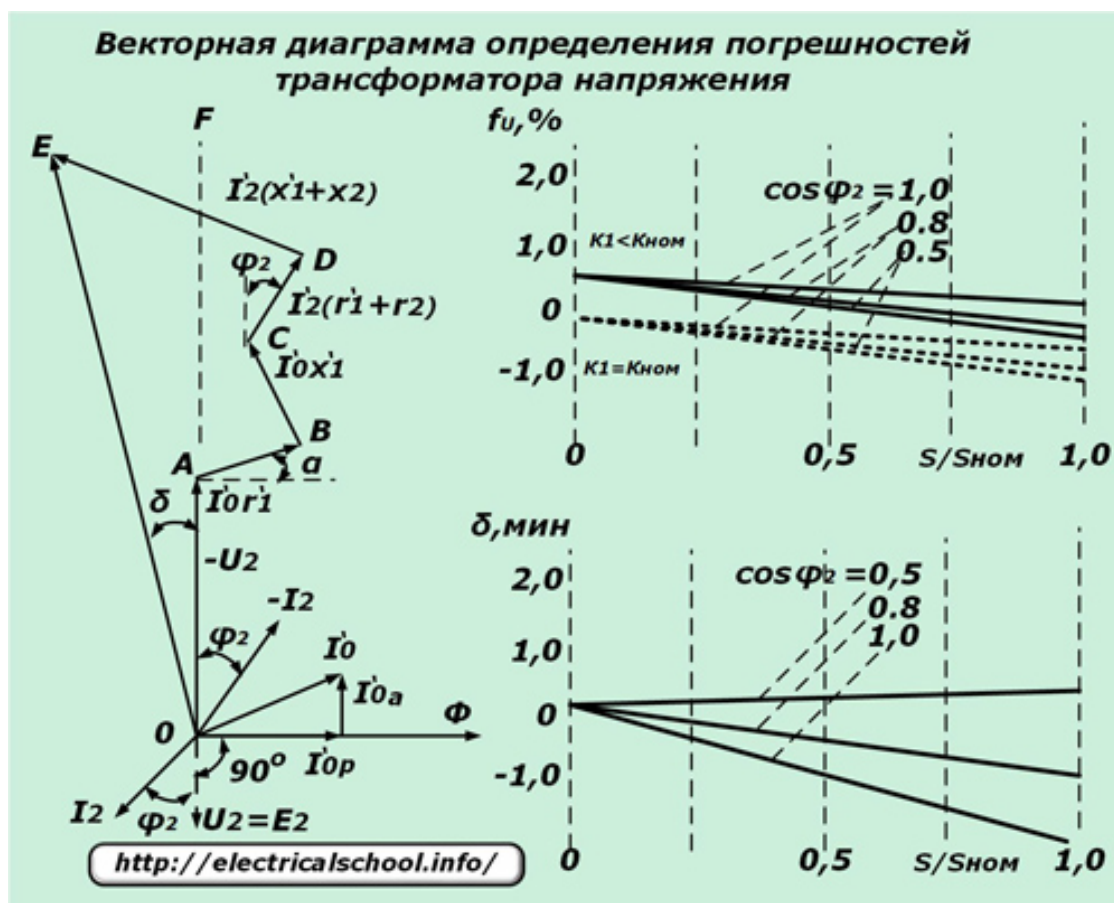
За счет этой возможности этот вариант используется на всех ответственных подстанциях, а вторичные цепи для таких ТН создаются с двумя видами обмоток, включаемыми по схемам звезды и треугольника.



Приведенные схемы включения обмоток являются наиболее типовыми и далеко не единственными. Современные измерительные трансформаторы обладают различными возможностями и под них вводятся определенные корректировки в конструкцию и схему подключения.

Классы точности измерительных трансформаторов напряжения

Для определения погрешностей при метрологических измерениях ТН руководствуются схемой замещения и векторной диаграммой.



Этот довольно сложный технический метод позволяет определить погрешности каждого измерительного ТН по амплитуде и углу отклонения вторичного напряжения от первичного и назначить класс точности для каждого поверяемого трансформатора.

Все параметры замеряются при номинальных нагрузках во вторичных цепях, на которые создан ТН. Если их превысить при эксплуатации или поверке, то погрешность выйдет за значение номинальной величины.

Измерительным трансформаторам напряжения присваиваются 4 класса точности.

Классы точности измерительных ТН	Максимальные пределы для допустимых погрешностей	
	$F_U, \%$	$\delta_U, \text{мин}$
3	3,0	Не определяется
1	1,0	40
0,5	0,5	20
0,2	0,2	10

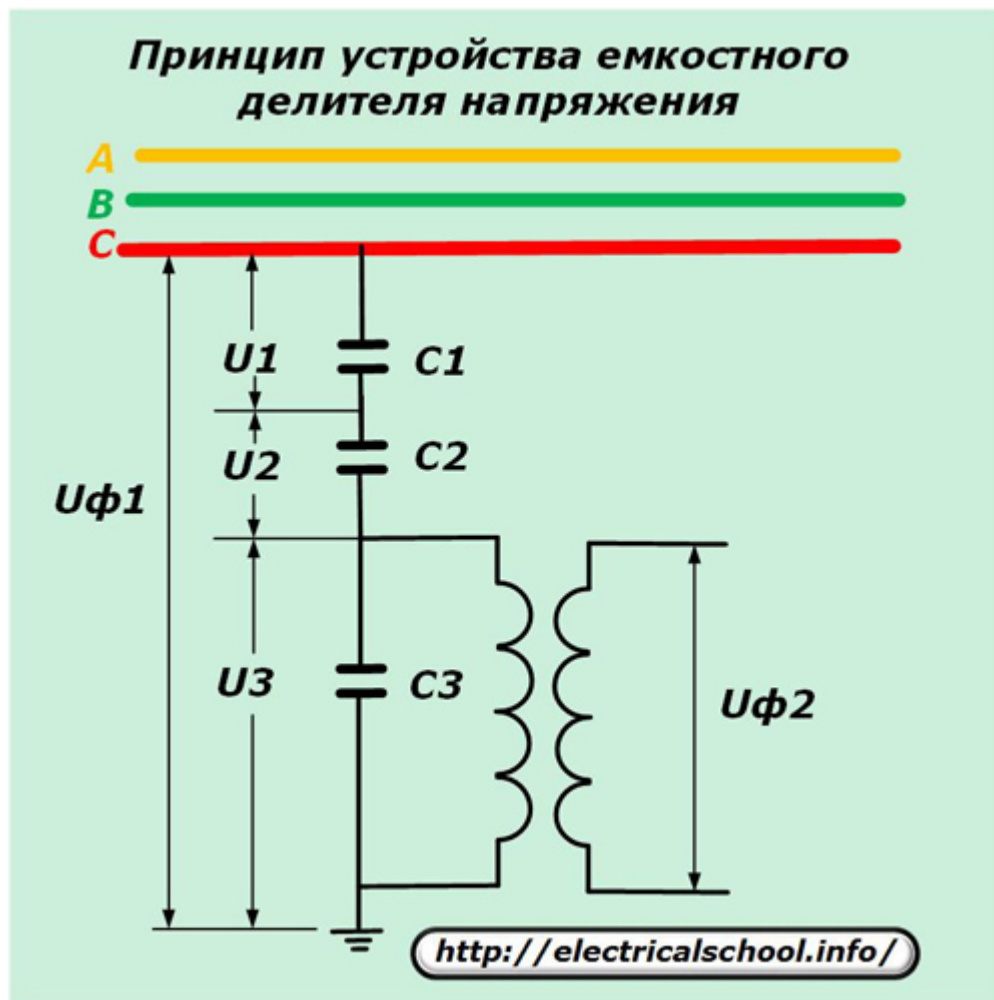
Класс №3 используется в моделях, работающих в устройствах РЗА, не требующих высокой точности, например, — для срабатывания элементов сигнализации о возникновении неисправных режимов в схемах питания.

Самой высокой точностью 0,2 обладают приборы, используемые для ответственных высокоточных измерений при наладках сложных устройств, проведения испытаний при приемке, настройках автоматики регулирования частоты и других подобных работах.

ТН с классами точности 0,5 и 1,0 чаще всего устанавливаются на высоковольтном оборудовании для передачи вторичных напряжений на щитовые приборы, контрольные и расчетные счетчики, релейные комплекты блокировок, защит, синхронизации цепей.

Способ емкостного отбора напряжения

Принцип этого метода заключается в обратно пропорциональном выделении напряжения на цепочке последовательно включенных обкладок конденсаторов разной емкости.



Рассчитав и подобрав номиналы емкостей, включенных последовательно с фазным напряжением шин либо линии $U_{ф1}$, удастся получить на конечном конденсаторе $C3$ вторичную величину $U_{ф2}$, которая снимается прямо с емкости или через подключенное для облегчения настроек трансформаторное устройство с регулируемым числом обмоток.

Особенности эксплуатации измерительных трансформаторов напряжения и их вторичных цепей

Требования к монтажу

В целях безопасности все вторичные цепи ТН должны быть защищены автоматическими выключателями типа АП-50 и заземлены медным проводом с сечением не менее 4 мм кв.

Если на подстанции используется двойная система шин, то цепи каждого измерительного трансформатора должны подключаться через схему реле повторителей положения разъединителей, которая исключает одновременную подачу напряжения на одно устройство РЗА от разных ТН.

Все вторичные цепи от клеммной сборки ТН до устройств РЗА должны выполняться одним силовым кабелем так, чтобы сумма токов всех жил была равна нулю. Для этого запрещено:

- отдельно выводить шинки «В» и «К» и объединять их для совместного заземления;
- подключать шинку «В» к устройствам синхронизации через контакты ключей, переключателей, реле;
- переключать шинку «В» на счетчиках контактами РПР.

Оперативные переключения

Все работы с действующим оборудованием производятся специально подготовленным для этого персоналом под контролем должностных лиц и по бланкам переключений. Для этого в цепях ТН установлены рубильники, предохранители, автоматические выключатели.

При выводе из работы определенного участка цепей напряжения обязательно указывается способ проверки выполненного мероприятия.

Периодическое техническое обслуживание

Вторичные и первичные цепи трансформаторов при эксплуатации подвергаются разным срокам проверок, которые привязаны ко времени, прошедшему после ввода устройства в эксплуатацию и включают в себя различный объем выполнения электротехнических замеров и чисток оборудования специально обученным ремонтным персоналом.

Основная неисправность, которая может проявиться в цепях напряжения при их эксплуатации — возникновение токов коротких замыканий между обмотками. Чаще всего это происходит при невнимательной работе специалистов электриков в действующих цепях напряжения.

При случайном закорачивании обмоток отключаются защитные автоматические выключатели, расположенные в клеммном ящике на измерительном ТН, и пропадают цепи напряжения, питающие реле мощности,

комплекты блокировок, синхронизма, дистанционные защиты и другие устройства.

В этом случае возможно ложное срабатывание действующих защит или отказ их работы при возникновении неисправностей в первичной схеме. Такие замыкания необходимо не только быстро устранять, но и включать все автоматически отключенные устройства.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения являются обязательным элементом на любой электрической подстанции. Они необходимы для надежной работы устройств релейной защиты и автоматики.

7. ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Электрическое оборудование трансформаторных подстанций в нормальном режиме работы находится в исправном техническом состоянии и не представляет опасности для человека.

Металлические части корпуса изолированы от токоведущих частей оборудования. Но в случае возникновения аварийной ситуации в электрической сети, которая сопровождается повреждением изоляции оборудования или замыканием одной из фаз сети на землю, человек при контакте с оборудованием или нахождении в непосредственной близости с ним будет подвержен удару электрическим током.

Ток величиной 90-100 мА и выше, воздействующий на организм человека в течение доли секунды, является смертельным. Тяжесть удара электрическим током зависит также от путей прохождения тока и от физиологических особенностей организма человека, поэтому часто смертельным может быть ток и меньшей величины.

Для предотвращения поражения персонала, обслуживающего электроустановки, электрическим током, металлические части корпусов оборудования, а также металлические элементы, находящиеся в непосредственной близости к оборудованию, подлежат заземлению.

Заземление подразумевает соединение металлических элементов, корпусов оборудования с заземляющим контуром электроустановки, в данном случае подстанции.

Перечислим, какие элементы оборудования распределительных подстанций заземляют:

- бак силового трансформатора;
- корпус электродвигателя;

- бак высоковольтного выключателя;
- металлические элементы шинных порталов, опорных конструкций разъединителей, отделителей и другого оборудования распределительных устройств;
- дверцы, ограждения, корпуса распределительных щитов, шкафов с оборудованием;
- металлическая броня кабельных линий независимо от назначения (силовых, вторичной коммутации), концевые и соединительные кабельные муфты с металлическим корпусом;
- вторичные обмотки трансформаторов тока и трансформаторов напряжения;
- металлические гладкостенные и гофрированные трубы, в которых прокладываются электропроводки и другие металлические корпуса действующего оборудования и устройств электроустановок.



Конструктивные особенности заземляющего устройства подстанции

Заземляющее устройство подстанции конструктивно состоит из двух основных элементов – заземлителя и заземляющих проводников (заземляющих шин).

Заземлитель – это металлические элементы, которые прикасаются непосредственно с землей. Заземлители, в свою очередь, бывают двух типов –

естественными и искусственными. К естественным заземлителям можно отнести различные металлоконструкции, часть которых заходит в землю, трубопроводы различного назначения (за исключением газовых и других трубопроводов, по которым протекают горючие жидкости), металлические оболочки (броня) кабельных линий, проложенных в земле. Искусственные заземлители выполняют посредством закапывания в землю стальных труб, стержней, полос, угловой стали.

Заземляющие проводники осуществляют соединение металлических частей оборудования и других элементов, подлежащих заземлению, с заземлителем. То есть посредством заземляющих проводников происходит заземление оборудования.

Корпуса оборудования, опорные конструкции оборудования и т.д. заземляются при помощи жестких металлических шин. Заземляющие шины окрашиваются в черный цвет. В определенных местах на заземляющих шинах и на заземленных металлических элементах должны быть предусмотрены места установки переносных защитных заземлений. Данные места зачищаются, покрываются смазочным материалом для предотвращения окисления металла, возле данных мест устанавливается в виде готового знака или наносится краской знак заземления.

Переносные защитные заземления состоят из гибких медных проводников, присоединяющихся к заземленным и заземляемым элементам при помощи специальных зажимов. Переносные заземления играют роль заземляющих проводников, они применяются для заземления участков электрической сети для обеспечения безопасности при выполнении ремонтных работ, для заземления спецтехники, которая применяется для выполнения работ в пределах электроустановки или в непосредственной близости к линиям электропередач.

Подвижные элементы оборудования – дверцы шкафов, ограждения, стационарные заземляющие ножи разъединителей и др. для обеспечения надежного контакта с заземленным корпусом шкафа или опорной конструкцией соединяют гибкими медными проводниками.

Присоединение металлических заземляющих шин к заземляющимся конструкциям осуществляется посредством сварки. Подключение заземляющих шин к корпусам оборудования, в зависимости от его конструктивных особенностей может осуществляться как сваркой, так и при помощи болтовых соединений. Медные заземляющие проводники подвижных элементов оборудования подключаются к заземленным элементам болтовыми соединениями или пайкой, если требуется подключить медный проводник к металлической оболочке кабельной линии.



Особенности эксплуатации заземляющих устройств

Существуют нормированные значения сопротивления заземляющих устройств. В зависимости от рабочего напряжения электроустановки, уровня токов замыкания на землю, допустимое максимальное сопротивление заземляющего контура подстанции может варьироваться от 0,5 до 4 Ом.

В процессе эксплуатации заземляющие устройства должны периодически проходить проверку. Проверка выполняется не реже одного раза в 6 лет и состоит из двух этапов – измерения сопротивления заземляющего устройства и выборочной проверки состояния заземлителей.

Также в процессе эксплуатации оборудования электроустановок необходимо периодически проводить зачистку мест установки переносных защитных заземлений от ржавчины и покрытие их новым слоем смазки для предотвращения образования коррозии.